

令和 3 年度

文部科学省 国家課題対応型研究開発推進事業

原子力システム研究開発事業

原子炉中性子リアルタイムモニタリング
のための太陽電池型線量計の開発

成果報告書

令和 4 年 3 月

国立研究開発法人 理化学研究所

本報告書は、文部科学省の原子力システム
研究開発事業による委託業務として、国立研
究開発法人 理化学研究所が実施した令和 2
年度-令和 3 年度「原子炉中性子リアルタイム
モニタリングのための太陽電池型線量計の開
発」の成果を取りまとめたものです。

目次

概略	iv
1. はじめに	1-1
2. 業務計画	
2.1 全体計画	2.1-1
2.2 令和3年度の成果の目標および業務の実施方法	2.2-1
3. 令和3年度の実施内容および成果	
3.1 中性子束計測場の形成に関する研究	3.1-1
3.1.1 中性子照射場の構築と照射	3.1-1
3.1.2 高温環境における中性子照射	3.1-4
3.2 太陽電池型中性子検出素子の特性解明に関する研究（再委託先：東北大）	3.2-1
3.2.1 In-situ 測定システムおよび線量解析ソフトの開発	3.2-1
3.2.2 アルファ線誘起電流の解明	3.2-11
3.2.3 中性子誘起電流の解明	3.2-12
3.2.4 ガンマ線誘起電流の解明	3.2-13
3.3 中性子／アルファ粒子変換膜構造最適化に関する研究（再委託先：木更津高専）	3.3-1
3.4 太陽電池型素子の出力劣化の補正法の確立と高温環境耐性確立 に関する研究（再委託先：JAXA）	
3.4.1 劣化補正法の確立	3.4-1
3.4.2 高温耐性の確立	3.4-4
3.5 太陽電池型検出素子における α 線（He イオン）誘起劣化の He エネルギー依存性解明のため、照射技術開発と、He 誘起劣化特性取得（再委託先：QST）	
3.5.1 劣化特性解明	3.5-1
3.6 研究推進	3.6-1
4 結言	4-1

表一覧

表 3.1.1	RANS および RANS-II のパラメータ	3.1-1
表 3.4.1	InGaP 太陽電池の電流出力の裏面電極構造別の統計処理結果	3.4-6
表 3.4.2	計算に用いた各イオンの InGaP に対する NIEL 値	3.4-6
表 3.4.3	InGaP 太陽電池の劣化補正パラメータ	3.4-6
表 3.5.1	TIARA における令和 3 年度照射実験実績	3.5-1

図一覧

図 2.1-1	令和 2 年度研究計画	2.1-1
図 2.1-2	令和 3 年度研究計画	2.1-2
図 3-1-1	RANS および RANS-II のレイアウト全景	3.1-1
図 3.1-2	RANS および RANS-II の照射位置における中性子のエネルギースペクトル	3.1-2
図 3.1-3	$^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ の断面積および RANS および RANS-II の照射位置における 反応率計算結果	3.1-3
図 3.1-4	RANS および RANS-II における同一試料の発電電流（実測値）	3.1-3
図 3.1-5	高温中性子照射用ホルダー全体図	3.1-5
図 3.1-6	アルミチェンバー外観	3.1-5
図 3.1-7	アルミチェンバー内部	3.1-5
図 3.1-8	試料ステージ	3.1-6
図 3.1-9	試料ステージへの太陽電池セル取付	3.1-6
図 3.1-10	試料ステージを内包したアルミチェンバー	3.1-7
図 3.1-11	アクリルバインダーを用いて作製した B_4C 膜を有した InGaP 太陽電池の 中性子照射時の誘起電流	3.3-7
図 3.1-12	RANS 遮蔽体内に高温中性子照射用ホルダーを設置した様子	3.1-7
図 3.1-13	試料ステージ昇温結果	3.1-8
図 3.2-1	InGaP 太陽電池による (a) ガンマ線および (b) 中性子線検出素子構造	3.2-1
図 3.2-2	(a) InGaP 照射照射位置における中性子スペクトルエネルギースペクトルおよび (b) ^{10}B の中性子捕獲断面積のエネルギー依存性	3.2-2
図 3.2-3	(a) InGaP 照射照射位置における中性子スペクトルエネルギースペクトルおよび (b) ^{10}B の中性子捕獲断面積のエネルギー依存性	3.2-2
図 3.2-4	(a) InGaP 太陽電池およびボロン変換膜のおよび (b) 変換膜設置後の 素子の外観	3.2-3
図 3.2-5	InGaP 太陽電池の中性子検出のイメージ	3.2-3
図 3.2-6	太陽電池型線量計の測定体型	3.2-4
図 3.2-7	InGaP 太陽電池型中性子検出センサーの試作機外観	3.2-4
図 3.2-8	RANS 中性子環境中での測定系	3.2-5
図 3.2-9	太陽電池型線量計ホルダー設置時の写真	3.2-5

図 3.2-10	中性子照射時の変換膜ありおよび変換膜なしの電流信号と 中性子フラックスの関係	3.2-6
図 3.2-11	変換膜ありおよび、なしの InGaP 太陽電池センサーの発生電流の中性子フラックス 依存性	3.2-7
図 3.2-12	可視光による太陽電池誘起電流校正曲線取得装置の概要図	3.2-8
図 3.2-13	InGaP 太陽電池の光誘起電流の挙動	3.2-8
図 3.2-14	InGaP 太陽電池の光校正曲線と RANS 中性子照射誘起電流の比較	3.2-8
図 3.2-15	InGaP 太陽電池を用いた中性子計測システムのソフトウェア	3.2-9
図 3.2-16	InGaP 太陽電池の中性子照射環境下での長時間照射による電流挙動	3.2-10
図 3.2-17	InGaP 太陽電池の放射線誘起電流の中性子劣化挙動	3.2-10
図 3.2-18	InGaP 太陽電池を用いた中性子計測システムにおける劣化補正モデル	3.2-10
図 3.2-19	劣化補正後の InGaP 太陽電池を用いた中性子環境下での誘起電流挙動	3.2-11
図 3.2-20	MT チャンバーにおける InGaP 太陽電池のその場測定用治具	3.2-12
図 3.2-21	高温環境下における InGaP 太陽電池のヘリウムイオン誘起電流挙動	3.2-12
図 3.2-22	高温場での中性子照射時のその場電流測定用治具の写真	3.2-13
図 3.2-23	20 °C および 275 °C における中性子検出特性	3.2-13
図 3.2-24	(a) 高温チャンバー外観 (b) 電流測定用プローブ (c) ガンマ線照射試験	3.2-14
図 3.2-25	InGaP 太陽電池の高温場における (a) ガンマ線誘起電流挙動 (b) 誘起電流の標準偏差 (c) 暗電流	3.2-14
図 3.2-26	高温試験前後における暗電流電圧特性の変化	3.2-15
図 3.2-27	高温試験前後における静電容量—電圧特性の変化	3.2-15
図 3.3-1	密度 100 % の窒化ホウ素 (BN) で計算したアルファ線放出の膜厚依存性	3.3-1
図 3.3-2	本研究で用いたスクリーン印刷装置の外観	3.3-2
図 3.3-3	加熱硬化型エポキシ樹脂をバインダーに用いて作製した B ₄ C 膜の外観	3.3-2
図 3.3-4	加熱硬化型エポキシ樹脂をバインダーに用いて作製した B ₄ C 膜および LiF 膜の X 線回折パターン	3.3-3
図 3.3-5	中性子コンバータ膜を有した InGaP 太陽電池への中性子線照射方法	3.3-4
図 3.3-6	加熱硬化型エポキシ樹脂をバインダーに用いて作製した B ₄ C 膜を有した InGaP 太陽電池の中性子照射時の誘起電流	3.3-4
図 3.3-7	加熱硬化型エポキシ樹脂をバインダーに用いて作製した B ₄ C 膜および LiF 膜を有した InGaP 太陽電池の誘起電流と陽子線電流	3.3-5
図 3.3-8	アクリルバインダーを用いて作製した B ₄ C 膜の外観	3.3-5
図 3.3-9	アクリルバインダーを用いて作製した LiF 膜の外観	3.3-6
図 3.3-10	アクリルバインダーを用いて作製した B ₄ C 膜および LiF 膜の X 線回折パターン	3.3-6
図 3.3-11	アクリルバインダーを用いて作製した B ₄ C 膜を有した InGaP 太陽電池の中性子照射時の誘起電流	3.3-7
図 3.3-12	アクリルバインダーを用いて作製した B ₄ C 膜および LiF 膜を有した	

InGaP 太陽電池の誘起電流と陽子線電流の関係	3.3-8
図 3.4-1 InGaP 太陽電池の短絡電流密度 (I_{sc}) の、He イオン照射による照射時温度をパラメータとした劣化特性. (a) はエネルギーが 2 MeV、 (b) はエネルギーが 190 ないし 200 keV	3.4-7
図 3.4-2 InGaP 太陽電池の短絡電流密度 (I_{sc}) の、H イオン照射による照射時温度をパラメータとした劣化特性. (a) はエネルギーが 3 MeV、 (b) はエネルギーが 190 ないし 200 keV	3.4-7
図 3.4-3 InGaP 太陽電池の短絡電流密度 (I_{sc}) の、Li イオン照射による室温 (RT) での劣化特性. (a) はエネルギーが 1 MeV、 (b) はエネルギーが 200 keV	3.4-7
図 3.4-4 横軸を変位損傷線量 (DDD) によりプロットした、InGaP 太陽電池の短絡電流密度 (I_{sc}) の H イオン照射 (エネルギーエネルギー 3 MeV、190/200 keV) による室温での劣化特性	3.4-8
図 3.4-5 横軸を変位損傷線量 (DDD) によりプロットした、InGaP 太陽電池の短絡電流密度 (I_{sc}) の He イオン照射 (エネルギーエネルギー 1.5 MeV、190/200 keV) による室温での劣化特性	3.4-8
図 3.4-6 横軸を変位損傷線量 (DDD) によりプロットした、InGaP 太陽電池の短絡電流密度 (I_{sc}) の Li イオン照射 (エネルギーエネルギー 1 MeV、200 keV) による室温での劣化特性	3.4-8
図 3.4-7 H、He、Li イオン照射による InGaP 太陽電池の短絡電流密度 (I_{sc}) の室温での劣化特性の変位損傷線量 (DDD) によるプロット	3.4-9
図 3.4-8 H、He、Li イオン照射による InGaP 太陽電池の短絡電流密度 (I_{sc}) の室温での劣化特性の補正した変位損傷線量 (DDD) によるプロット	3.4-9
図 3.4-9 H、He、Li イオン照射による InGaP 太陽電池の開放電圧 (V_{oc}) の室温での劣化特性の I_{sc} と同一の補正をした変位損傷線量 (DDD) によるプロット	3.4-9
図 3.4-10 InGaP 太陽電池の出力パラメータ温度依存性の測定概観	3.4-10
図 3.4-11 InGaP 太陽電池の出力パラメータの温度依存性. (a) は RT からの昇温時、 (b) は 300 °C からの降温時の結果	3.4-10
図 3.4-12 高温保持試験による、InGaP 太陽電池の電流出力 I_{sc} の変化. (a) は 200 °C、 (b) は 300 °C	3.4-10

略語一覧

BNCT	: Boron Neutron Capture Therapy (ホウ素中性子捕捉療法)
CIS	: Copper Indium Selenum (銅インジウムセレン (太陽電池))
DDD	: Displacement Damage Dose (変位損傷線量)
ENDF	: Evaluated Nuclear Data File (評価済み核データファイル)
Isc	: Short-circuit Current Density (短絡電流密度)
JAXA	: Japan Aerospace Exploration Agency (国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構)
JENDL	: Japanese Evaluated Nuclear Data Library (日本の汎用標準核データライブラリ)
LIV	: Light I-V (光照射下電流－電圧)
NIEL	: Non-Ionization Energy Loss (非イオン化エネルギー損失)
PHITS	: Particle and Heavy Ion Transport code System (粒子・重イオン輸送計算コード)
QST	: National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology (国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構)
RANS	:RIKEN Accelerator-driven compact Neutron Source (理研加速器駆動小型中性子源)
SMR	:Small Modular Reactor (小型モジュール炉)
TIARA	:Takasaki Ion Accelerators for Advanced Radiation Application (高崎イオン照射研究施設)
TOF	:Time Of Flight (飛行時間法)
WERC	: Wakasa wan Energy Research Center (公益財団法人若狭湾エネルギー研究センター)

概略

原子力利用においては、これまで、第四世代原子力システムに関する国際フォーラム等の枠組みにおいて、高度な安全性、持続可能性、良好な経済性等を開発目標とした革新的原子炉の研究開発が進められている。しかし、2011年に発生した東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所事故は、原子力災害の影響の甚大さを認識させるものとなり、各国の原子力政策に大きな影響を与えた。また、電力市場を始めとするエネルギー市場の自由化の進展に伴い、投資回収に長期を要する原子力事業は、リスクの高いものと見なされ、新設が難しくなっている。そのため、次世代炉開発においては、低コストでの研究開発、製造および運用が求められている。

小型モジュール炉 (Small Modulus Reactor: SMR) は1基あたりの炉価格が低く、建設期間が短いため初期投資が抑制でき早期の投資回収が可能である。安全性と投資リスクの両面からこれからの原子炉マーケットにおいて重要な位置づけを担っている。しかし SMR の冷却設計は、自然循環冷却であり、通常時および事故時において局所沸騰が起きた場合、冷却不能には至らずとも重大な事故につながる可能性は否定できない。そのため、局所沸騰を防止するため安全保護系の計測制御システムに対する規制要件への対応が求められると想定されている。原子炉制御においては、燃料から放出される高線量中性子のリアルタイム監視により、臨界状況を正確に把握する必要がある。しかし、原子炉は高温 (>200 °C) かつ高線量ガンマ線環境であるため、中性子のみの信号をリアルタイムで長時間正確に測定可能な既製の測定機器はない。

中性子は電荷を有しないため、原子の核外電子と相互作用せず、特定の原子核と強く相互作用を行う。そのため、中性子計測機器では、一般的に中性子を荷電粒子へ変換するコンバータを使用する。しかし、コンバータにより変換された荷電粒子を検出するシステムは、従来の放射線検出素子であるため、高線量ガンマ線の場合、中性子信号の正確な測定は困難である。我々はこの点に注目し、またこれまでの研究成果をもとに、簡素で小型・低コストかつ広いダイナミックレンジ (8 桁程度) を有する新たな中性子検出器を提案する。

研究者らは、太陽電池素子を放射線検出素子に応用したアルファ、ベータ、ガンマ線線量計システムの研究開発を行ってきており、線量測定技術を成熟させてきた。これらの成果により、新しい中性子検出器の概念として、 $^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha)^7\text{Li}$ 反応により放出されるアルファ線を太陽電池素子で検出することにより、中性子線量を測定できる素子を考案した。本研究では SMR への応用を目標とし、この太陽電池型中性子線量計開発を実施する。研究開発目標は、(1) 中性子検出素子と試作機の作製、(2) ヘリウムイオン照射試験による素子劣化特性の解明、(3) 高温中性子照射試験による線量率ダイナミックレンジの解明、の3つの項目である。本研究が完了した際には、検出素子の素子感度、素子寿命、高温駆動耐性を明らかとし、さらなる社会実装開発へと発展させるための知見を得ることが目的である。

提案する中性子線量計の基本構造は、高い放射線耐性を有する太陽電池素子の表面に、中性子をアルファ線に変換するホウ素などの層を表面に形成した素子 (Type-n) と、太陽電池素子そのものの (Type- γ) の2種類の素子を入れたセンサーを使用する構造となっている。Type-n と Type- γ の素子は、2種類の回路で電流を解析することにより、中性子線量を簡単かつ正確に解析することができると考えている。Type-n の素子では、中性子による素子放射化誘起電流 (n)、ガンマ線誘起電流 (γ) および、 $^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha)^7\text{Li}$ 反応アルファ線誘起電流 (α) が出力されと考えられる。Type- γ の素子では、n および γ と考えられる。そのため、Type-n と Type- γ の素子をそれぞれ独

立の回路で接続し、電流計から読まれる値の差により中性子信号を解析するか、Type-n と Type- γ を同じ回路に接続し、電流計に差分の α を誘導することで解析を行う。

本研究の開発項目は、以下 3 点である。

- (1) Type-n および Type- γ 素子の作製と試作機の作製
- (2) ヘリウムイオン照射試験による素子劣化特性の解明
- (3) 高温中性子照射試験による線量率ダイナミックレンジの解明

本研究では、現在開発済みの太陽電池素子を応用した中性子検出素子作製を実施する。インジウム-ガリウム-リン(InGaP)太陽電池は宇宙用 3 接合太陽電池成膜方法を応用したシャープ株式会社製 InGaP 単接合太陽電池の設計および作製を JAXA 調整のもと実施する。銅-インジウム-セレン(CIS)太陽電池は、ソーラフロンティア株式会社製の CIS 太陽電池を加工することによりガンマ線検出器として、特性を取得することに成功している。そのため本研究においても同 CIS 太陽電池を使用する。カドミウム-テルル(CdTe)太陽電池は独立行政法人国立高等専門学校機構木更津工業高等専門学校（以下「木更津高専」と略す。）の先行研究にて変換効率 10 %を超える素子が作製されている。本研究ではその素子作製技術を利用した素子作製を実施する。それぞれの太陽電池は、そのまま使用した場合は、Type- γ 素子となる。

コンバータ層の候補としては ^{10}B を含有する炭化ホウ素(B_4C)を予定している。1 年目では、 B_4C 板を購入し、太陽電池表面形状に合わせて板を切り出し、太陽電池表面に設置することで、コンバート層を有した Type-n 素子(B_4C 板セル)を作製した。 B_4C 板の加工については、国立大学法人東北大学（以下「東北大学」と略す。）が実施する。最終年度までに、木更津高専において太陽電池素子上に、数 μm 塗布し、その上から表面電極を作製する構造の作製方法について確立する。ホウ素化合物の中でも B_4C は体積抵抗が 0.1-10 Ωcm と低いことから、 B_4C はコンバートおよび表面電極の機能を併せ持つことになる。東北大学において試作システムを作製し、国立研究開発法人理化学研究所（以下「理化学研究所」と略す。）にて、既知の線量・エネルギースペクトル照射場にて中性子線量計の動作を検証した。

太陽電池素子へ高エネルギーヘリウムイオンビームを照射し、中性子検出素子としての劣化挙動の解明を実施した。ヘリウムイオン照射については国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構（以下「QST」と略す。）が実施した。QST 高崎量子応用研究所にはイオンビーム加速器施設(TIARA)が設置されており、イオン注入装置(IM)、およびタンデム加速器(TA)を用いてヘリウムイオンを照射することができる。1 年目には、IM および TA において、太陽電池照射環境を整備した。2 年目には、0.02~2 MeV のヘリウムイオン照射を実施し、ヘリウムイオン照射時の太陽電池劣化挙動を取得した。劣化挙動解析は国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構（以下「JAXA」と略す。）が実施し、宇宙用太陽電池の劣化挙動解析に準拠した方法で、相対損傷係数を取得した。また、東北大学が太陽電池素子劣化時の放射線誘起電流挙動を各種放射線照射時に in-situ 測定にて取得した。

本研究では、中性子源として一定の強度があり、アクセスしやすい加速器中性子源に着目し、理研 RANS(RIKEN Accelerator-driven Neutron Source)において高温・in-situ 測定照射試験が可能な装置開発を実施する。1 年目および 2 年目では、 B_4C 板設置型太陽電池素子を用いて、理化学研究所および東北大学が、中性子照射場にて検出挙動および、その劣化特性について解明を実施する。RANS における照射場の中性子のエネルギースペクトルおよび、線量率については、放射

線挙動シミュレーションおよび実測を組み合わせることにより解析するとともに、減速材や吸収体の配置によって調整を行った。また、太陽電池素子の中性子長時間照射による劣化挙動試験を実施した。RANS では、中性子長時間連続照射用の照射ポケットがあり、そのポケットにて、Type- γ の素子の照射を実施し、照射前後での太陽電池特性を評価することにより劣化挙動を解明した。

また、中性子照射劣化評価の時間短縮に向けた中性子強度の強化構造をポケット周辺に構築した。2 年目では、200 °C 以上に保持可能で、中性子照射中の in-situ 測定が可能な容器を作製し、Type-n 素子の中性子検出挙動の温度依存性について解明した。

以上の項目を実施することにより、過酷環境下において安定・安全に駆動する世界に類のない低コスト中性子線量計を開発することを目指した。

通常、中性子検出器は製品販売市場が小さいため、独自の製品開発では開発および、サプライチェーンの維持にコストがかかる。CIS、CdTe、InGaP 太陽電池素子を応用した場合、高効率のデバイスが開発済みであること、生産技術の確立により既製品があることから、中性子検出器の開発コストだけでなく、実際の製品化コストも低く抑えることが可能になる。ガンマ線補償型電離箱の既存製品では、180 °C の環境では 3 分程度の測定が限界であり、高温環境下での長時間安定駆動が大きな課題であった。そのため、本研究では、200 °C での長時間動作を目標としている。

原子炉以外における波及効果としては加速器中性子源での利用が考えられる。加速器中性子源は医療分野においてはホウ素中性子捕捉療法 (BNCT) 用途で、工業分野においては非破壊検査の用途で注目されている。本研究で開発される太陽電池型中性子線量計は、上記の分野で使用される中性子フラックス環境下での測定も可能と想定されることから、低コスト化により中性子センサー市場を席巻できると考えられる。また、太陽電池素子はフレキシブル化が可能であることから、ガス封入式の電離箱では達成できないフレキシブル中性子検出素子へと発展させることができる期待される。医療分野においては人体に対して局所的かつ正確に線量を測定することが求められるため、ウェアラブル化が可能なフレキシブル素子が非常に有望である。

1. はじめに

我々はこれまでに、太陽電池素子に外部電圧を印加することなく放射線により発生するキャリアを電流として誘起し、またその電流出力は線量に対して線形に増加することを見出し、これを用いたアルファ、ベータ、ガンマ線検出システムの研究開発を行ってきた。

太陽電池素子は、光吸収に最適な膜厚に設計されており、InGaP 太陽電池で 1 μm 、CIS 太陽電池で 2 μm 、および CdTe 太陽電池で 5 μm に調整されている。また、InGaP 太陽電池においては、素子表面がむき出しである。CIS および CdTe 太陽電池においては、1 μm 程度の非常に薄い透明導電膜層が形成された構造である。東北大学グループの先行研究によりアルファ線検出素子としての特徴が解明されており、アルファ線を模擬した 1 MeV のヘリウムイオン照射において、フラックスに応答した電流信号が取得できることが明らかになった。これらの成果より $^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha)^7\text{Li}$ 反応から放出されるアルファ線を太陽電池で検出することが可能であることが期待される。

これまでの研究により、各素子におけるアルファ線検出特性を取得しており、1 アルファ線あたり数十フェムト Acm^{-2} の電流密度を発生することを解明している。そのため、ボロン（ホウ素）コンバータを使用した場合、1 つの $^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha)^7\text{Li}$ 反応のアルファ線が 1 つ素子へ入射した場合、数十フェムト Acm^{-2} の出力が予測される。ただし断面積のエネルギー依存性があることおよび、アルファ線が等方的に出力されることから、素子のダイナミックレンジを予測することができない。そのため本研究では、各太陽電池にボロンコンバータを積層した際の、その中性子線量率測定範囲を検証する。

一般的に半導体素子は、放射線環境中で劣化を引き起こすが、先行研究において InGaP、CdTe および CIS 太陽電池においては、高い放射線耐性を有していることが報告されている。そのため、アルファ線を照射した際の放射線劣化挙動について解析を行い、中性子検出時の素子劣化挙動に関して解明し、その中性子検出としての寿命評価を行う。

本研究の素子開発の目標においては、SMR の炉心動作環境下での測定を想定しており、200 $^{\circ}\text{C}$ 以上での温度での測定を最終的な目標と設定する。InGaP 太陽電池においては、金星探査衛星への搭載に向けて 200 $^{\circ}\text{C}$ での動作試験が JAXA グループより実証されており、高温での安定した動作も十分期待できる。そのため、本研究では、太陽電池型中性子線量計の 200 $^{\circ}\text{C}$ 駆動も視野に入れた、太陽電池型中性子線量計の試作機研究開発を実施する。そして、本線量計開発の進展が可能な限り動作温度を 300 $^{\circ}\text{C}$ に近づくことを目指す。このことより、中性子計測用の太陽電池型線量計の開発が達成した暁には、SMR などの新型炉心付近の正確な中性子モニタリングにより、原子炉運転時の正確な臨界制御を行い、さらなる安全性の向上につながることを期待できる。

2. 業務計画

2.1 全体計画

本業務の全体計画図を図 2.1-1 および図 2.1-2 に示す。

業務項目	実施日程（令和2年度）											
	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
(1) 中性子束計測場の形成に関する研究 ① 中性子照射場の構築と照射 ② 高温環境における中性子照射									中性子照射場構築 中性子照射 ホルダー設計			
(2) 太陽電池型中性子検出素子の特性解明に関する研究 ① In-situ測定システムおよび線量解析ソフトの開発								In-situ	電流測定システムの準備			
(3) 中性子／アルファ粒子変換膜構造最適化に関する研究									変換膜の作製・評価			
(4) 太陽電池型素子の出力劣化の補正法の確立と高温環境耐性確立に関する研究 ① 劣化特性の解明 ② 劣化補正法の確立 ③ 高温耐性の確立									装置の再立ち上げ 素子設計・作製 治具・容器準備			
(5) 太陽電池型検出素子におけるアルファ線（Heイオン）誘起劣化のHeエネルギー依存性解明のための、照射技術開発と、He誘起劣化特性取得 ① 照射技術開発									治具・技術開発			
(6) 研究推進												

図2.1-1 令和2年度研究計画

業務項目	実施日程（令和3年度）											
	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
(1) 中性子束計測場の形成に関する研究												
① 中性子照射場の構築と照射	← 中性子照射 →											
② 高温環境における中性子照射	← ホルダー製作 →			← 高温照射 →							← とりまとめ →	
(2) 太陽電池型中性子検出素子の特性解明に関する研究												
① In-situ測定システムおよび線量解析ソフトの開発	← 線量解析ソフトウェアの開発 →											
② アルファ線誘起電流の解明	← アルファ線誘起電流の解明 →											
③ 中性子誘起電流の解明	← 中性子誘起電流の解明 →											
④ ガンマ線誘起電流の解明	← ガンマ線誘起電流の解明 →											
(3) 中性子／アルファ粒子変換膜構造最適化に関する研究												
(4) 太陽電池型素子の出力劣化の補正法の確立と高温環境耐性確立に関する研究												
② 劣化補正法の確立	← 放射線試験 →											
		← データ解析 →										
③ 高温耐性の確立	← 高温曝し試験 →											
(5) 太陽電池型検出素子におけるアルファ線（Heイオン）誘起劣化のHeエネルギー依存性解明のための、照射技術開発と、He誘起劣化特性取得												
② 劣化特性解明	← ガンマ線誘起電流の解明 →											
(6) 研究推進	← →											

図2. 1-2 令和3年度研究計画

2.2 令和3年度の成果の目標および業務の実施方法

(1) 中性子束計測場の形成に関する研究

① 中性子照射場の構築と照射

コンバータを成膜した太陽電池素子に対し、RANSにて中性子照射（常温）を行う。遮蔽体/減速材により中性子エネルギースペクトルを変化させ、誘起電流の測定値と計算値との比較評価を行う。

② 高温環境における中性子照射

ヒーターにより照射中の温度を 200 °C以上まで昇温して保持できる高温照射ホルダーを製作し、太陽電池素子の照射と in-situ 電流測定・劣化評価を行う。

(2) 太陽電池型中性子検出素子の特性解明に関する研究

① In-site 測定システムおよび線量解析ソフトの開発

汎用電流測定機器を使用した放射線照射中に発生する太陽電池の微小電流の測定システムを構築する。また、電流測定機器を PC に接続し、制御ソフトを利用した電流信号取得ソフトの作成の準備を実施する。

② アルファ線誘起電流の解明

ヘリウムイオン（以下「He イオン」と記す。）加速器を使用してボロンコンバータより放出されるアルファ線（以下「 α 線」と記す。）を模擬し、太陽電池素子に照射して誘起される電流量を測定し、その原理を検討する。

③ 中性子誘起電流の解明

ボロンコンバータを成膜した太陽電池素子に中性子照射を行い、誘起される電流量を測定し、その原理を検討する。

④ ガンマ線誘起電流の解明

太陽電池素子にガンマ線（以下「 γ 線」と記す。）照射を行い、誘起される電流量を測定し、その原理を検討する。

(3) 中性子／アルファ粒子変換膜構造最適化に関する研究

スパッタ法などを用いて中性子／ α 粒子変換膜構造のホウ素化合物などの成膜・評価を行う。さらに、化合物太陽電池のコンバータ層を形成し、電極を取り出す方法を検討する。

(4) 太陽電池型素子の出力劣化の補正法の確立と高温環境耐性確立に関する研究

① 劣化特性の解明

令和2年度に作製した InGaP 太陽電池を供試体として、 α 線模擬の He イオン照射試験を行う。その際、加速エネルギーを 0.02～2 MeV の範囲で変化させる。まず室温にて出力劣化データを取得し、次に 200～300 °C の高温にて同データを取得する。室温照射は QST 高崎研で、高温照射は公益財団法人若狭湾エネルギー研究センター（以下「WERC」と略す。）での実施を予定する。

② 劣化補正法の確立

①で取得した出力劣化データを基に、宇宙用太陽電池における解析法を応用して相対損傷係数を導き出す。次に、変位損傷線量法を用いて陽子および電子に対する劣化特性との比較解析を行い、劣化補正法を確立する。

③ 高温耐性の確立

InGaP 太陽電池の高温連続保持試験を行い、高温環境における劣化を明らかにする。雰囲気は大気中とし、劣化が大きい場合には不活性ガスないし真空での試験を追加する。温度はまず 200 °C とし、必要に応じて 300 °C までのより高い温度での試験を追加する。

- (5) 太陽電池型検出素子における α 線 (He イオン) 誘起劣化の He エネルギー依存性解明のための照射技術開発と、He 誘起劣化特性取得

① 劣化特性解明

太陽電池素子への He イオン照射を行う。チャンバー内サンプル保持治具の作製を行う。太陽電池素子における H イオン誘起劣化特性を JAXA と共同で取得し、特性劣化の結果より照射条件の最適化検討を行う。

- (6) 研究推進

およそ 3 か月に 1 回、研究打ち合わせを行う。令和 4 年 3 月中旬から下旬の間に、全関係者にて当年度のまとめを行い、研究の進捗と方向性を検証する。

3. 令和3年度の実施内容および成果

3.1 中性子束計測場の形成に関する研究

3.1.1 中性子照射場の構築と照射

理化学研究所の RANS⁽¹⁾ は平成 25 年に完成し、7 MeV 陽子線ライナックとベリリウム薄膜ターゲットの組み合わせによる小型中性子源システムとして、埼玉県和光市で稼働している。実用材料の非破壊解析がほとんどのテーマを占め、代表的な実験課題としてはコンクリート内部の非破壊観察⁽²⁾、合金における腐食部分の水の挙動観察⁽³⁾、鋼板の応力下における集合組織の挙動解析⁽⁴⁾等が挙げられる。平成 29 年 7 月には性能向上を目指し、ベリリウムターゲットの新調、実験毎にモデレータを交換可能とするシステムの構築、陽子ビームラインの再整備が行われた。一方、令和元年には、さらに軽量の可搬型加速器中性子源を開発するための基礎データ取得を行うために 2.49 MeV 陽子線ライナックおよびリチウムターゲットを利用した RANS-II が完成した⁽⁵⁾。図 3.1.1 に RANS および RANS-II の全景模式図を、表 3.1-1 にそれぞれのパラメータを示す。

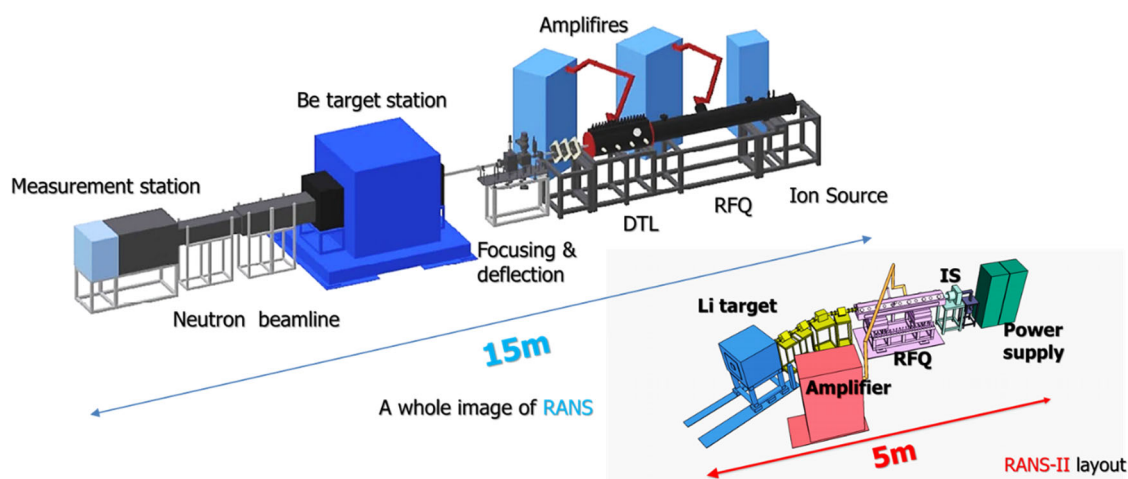


図 3.1-1 RANS および RANS-II のレイアウト全景

表 3.1-1 RANS および RANS-II のパラメータ

	RANS	RANS-II
加速粒子	Proton	Proton
加速エネルギー	7 MeV	2.49 MeV
最大加速電流	100 μA	100 μA
中性子発生反応	${}^9\text{Be}(p, n){}^9\text{B}$	${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{B}$
最大中性子発生量	10^{12} sec^{-1}	10^{11} sec^{-1}
重量(加速器)	5 t	2.5 t
重量(遮蔽体)	20 t	3.5 t
長さ	15 m	5 m

RANS-II はサイズをコンパクト化したためにエネルギー、発生中性子量ともに RANS より小さくなっており、これまでは課題増や故障等による RANS のマシンタイム不足の際に使用する予備的な位置付けとしていたが、令和 3 年度は遮蔽体／減速材並びに線源選択により中性子エネルギースペクトルとガンマ線を変化させ比較検討するために利用した。

以下では誘起電流の計算値並びに測定値の比較評価を行う。図 3.1-2 に RANS および RANS-II の太陽電池照射位置（モデレータ表面から 20 mm とした）における中性子エネルギースペクトルの計算結果を示す。陽子電流は 100 μA である。計算にはモンテカルロ計算コード PHITS⁽⁶⁾（バージョン 3.24）および核データ ENDF/B-VII.1 を使用した。図 3.1-3 には核データ JENDL-4.0 に収められている $^{10}\text{B}(n, \alpha)$ の反応断面積および太陽電池照射位置における反応率（断面積と中性子エネルギースペクトルとの積）を示す。反応率の総和を計算すると、同じ陽子電流の場合、RANS および RANS-II における太陽電池の発電電流の比は 3.26 と計算された。

一方、図 3.1-4 に同一試料（InGaP 太陽電池セルに B_4C コンバータを載せたもの）を RANS および RANS-II において照射した際の陽子電流と発電電流の関係を示す。本図における傾きの比（発電電流の比）は 46.1 と計算された。この実測値と計算値との乖離は将来的に解明すべき課題である。現時点で RANS のケースに対して RANS-II のケースの発電電流が低い理由としては、RANS-II の陽子ビームがリチウム標的の中心からずれている可能性が考えられる。その結果として、①中性子発生領域と太陽電池セルとの距離が計算より離れている、②陽子ビームの全量がリチウム標的に当たっていない、という二つの要因により発電電流が計算評価値よりも大きい比を示したものと考えられる。今後の課題として、計算に用いる位置情報の精密測定並びに陽子ビームの中心位置と広がり の正確な評価が必要と考えられる。

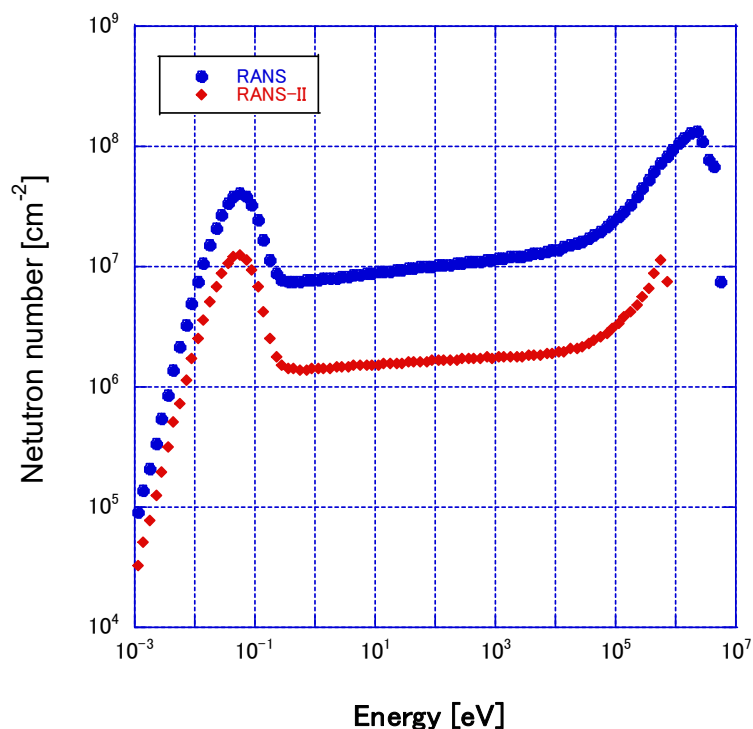


図 3.1-2 RANS および RANS-II の照射位置における中性子のエネルギースペクトル

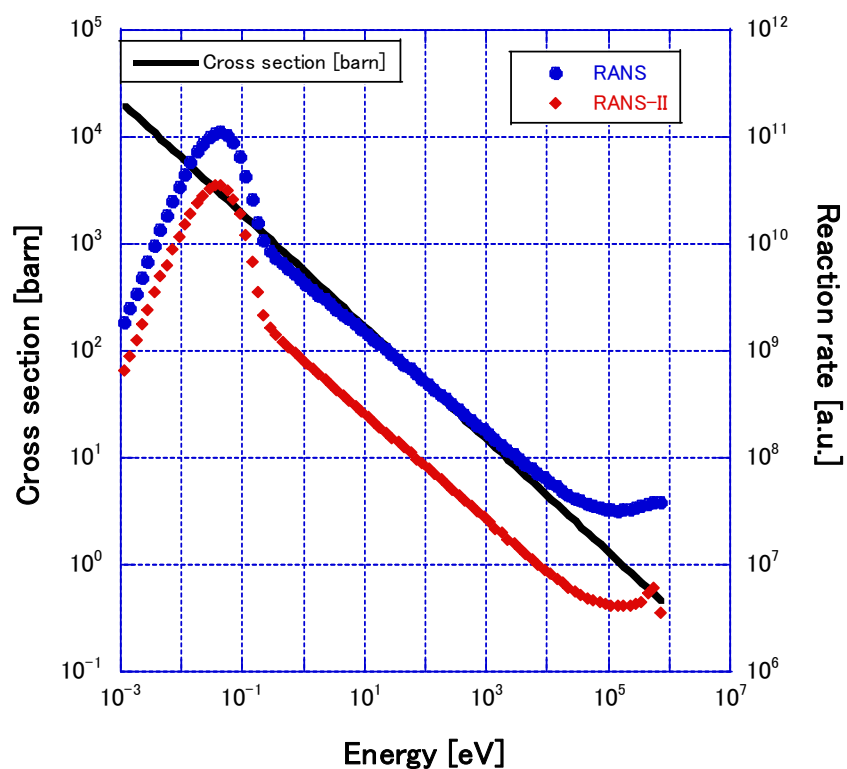


図 3.1-3 $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ の断面積および RANS および RANS-II の照射位置における反応率計算結果

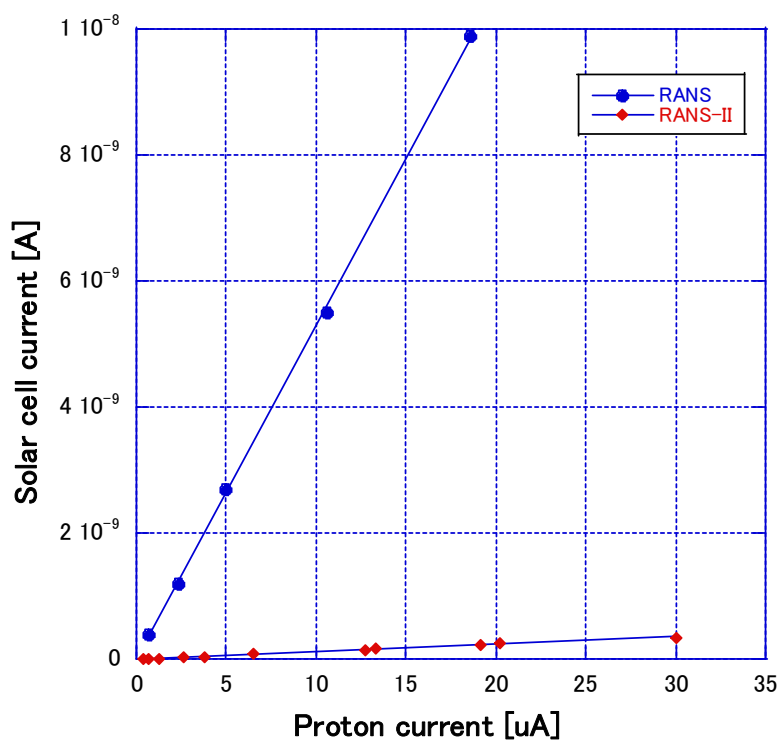


図 3.1-4 RANS および RANS-II における同一試料の発電電流（実測値）

3.1.2 高温環境における中性子照射

令和3年度は高温中性子照射を行うためのホルダーの製作および実照射を行った。令和2年度に考案した要求仕様を製作者に伝え、より具体的な設計仕様をまとめた。以下に実際に製作した高温中性子照射用ホルダーの仕様を示す。

- (1) 温度可変型加熱試料ステージ（以下、試料ステージという）を備え、温度制御範囲は室温～300℃とする。
- (2) 試料ステージの温度制御性は、室温～100℃を±1.5℃、100℃～300℃を±1%以下の範囲で制御可能とする。
- (3) 試料ステージには水冷機構を備える。
- (4) 試料ステージはアルミチャンバー（材質：A5052）内に収納する。
- (5) 試料ステージは直径60mm以上の大きさを持ち、直径30mmの円盤試料を少なくとも2個設置できるものとする。
- (6) アルミチャンバーはOリングシールにて内部を真空またはガス雰囲気（封じ切りまたはフロー）に保持可能とする。
- (7) アルミチャンバーには試料観察用窓を設ける。
- (8) アルミチャンバー内には中継端子台を設ける。
- (9) アルミチャンバーには計測用のBNC端子フィールドスルー（出入部）を4系統装備し、中継端子台との間はシールドケーブルにて配線を行う。
- (10) アルミチャンバーには熱電対用・ヒーター電流用のフィールドスルーをそれぞれ2系統および1系統設ける。
- (11) アルミチャンバーはアルミ製の板（スライドベーステーブル）上に設置する形態とし、その板上には中性子やγ線を遮蔽するためのブロックの設置空間を設ける。また、アルミ製板の裏面には、スライド抵抗を低減するためのポリエチレン製板を設ける。
- (12) アルミチャンバーは幅140mm、高さ140mm（スライドベーステーブルを含む）とし、RANSおよびRANS-IIの照射口に挿入可能とする。
- (13) 試料ステージ冷却用の循環型冷却水チラーを付属させる。
- (14) 試料ステージ温度制御用のコントローラおよび電源を付属させる。
- (15) コントローラは、外部制御可能な通信用インタフェースを具備する。
- (16) 本試料ホルダーに使用する材料は中性子吸収による放射化を最小限とするため、アルミ製または樹脂製を基本とする。ネジ類についてはチタン製とする。

図3.1-5に高温中性子照射用ホルダーの全体像を示す。仕様に挙げたモジュールには以下の番号を付した。①試料ステージ、②アルミチャンバー、③スライドベーステーブル、④冷却水循環チラー、⑤温度制御用コントローラ、⑥温度制御用電源



図 3.1-5 高温中性子照射用ホルダー全体図

図 3.1-6 にアルミチェンバーの外観を、図 3.1-7 にアルミチェンバーの内部を示す。中性子は図 3.1-6 の左側より飛来する。アルミチェンバー上部にはガラス製の覗き窓を設置し、試料の設置状態や変形等を監視することができる。赤外線温度計によって試料温度を観測する場合にはガラスを石英に変更する必要がある。アルミチェンバー端面はバイトンゴム製の O リングが設置しており、内圧を正圧・負圧ともに調整可能となっている。



図 3.1-6 アルミチェンバー外観



図 3.1-7 アルミチェンバー内部

図 3.1-8 に試料ステージを示す。試料ステージには熱電対 2 組およびカートリッジヒーターが設置され、冷却水が循環する構造になっている。外部へのフィードスルーとしては上記に加え、電気測定用端子（4 本）、ガス導入ライン（2 本）が設けられている。このステージ上に太陽電池セルを設置するにあたり、セルをステージから電氣的に切り離すために絶縁体（カプトン）のシートを設置し、セルの表裏にコンタクトを取るための機構を製作した。2 組の太陽電池セルが設置されている様子を図 3.1-9 に示す。

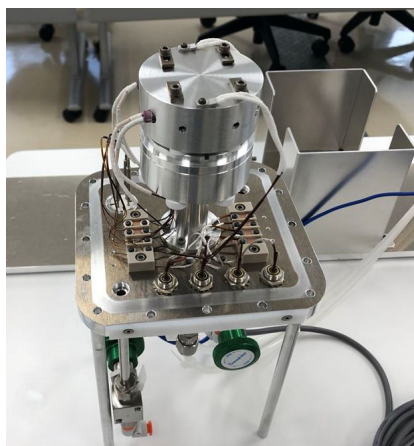


図 3.1-8 試料ステージ

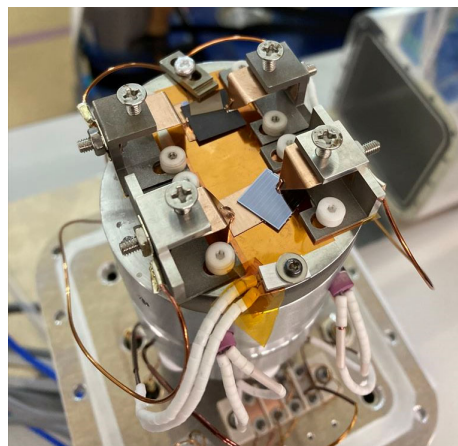


図 3.1-9 試料ステージへの太陽電池セル取付

試料ステージをアルミチェンバーに設置し、さらにスライドベーステーブル上に設置した様子を図 3.1-10 に示す。後方に伸びているのは真空引きおよびガス導入ラインと冷却水チューブ（往・還）である。



図 3.1-10 試料ステージを内包したアルミチェンバー

高温中性子照射は、図 3.1-11 に示す遮蔽体正面の照射口よりアクセスして行う。右上挿入図は照射口（1 辺が 15 cm）である。最深部にはポリエチレン製モデレータが確認でき、その周辺部の中性子束が最も大きい。高温中性子照射用ホルダーを挿入し、照射準備を行っている様子を図 3.1-12 に示す。



図 3.1-11 RANS 遮蔽体のビーム取り出し側と照射口内部

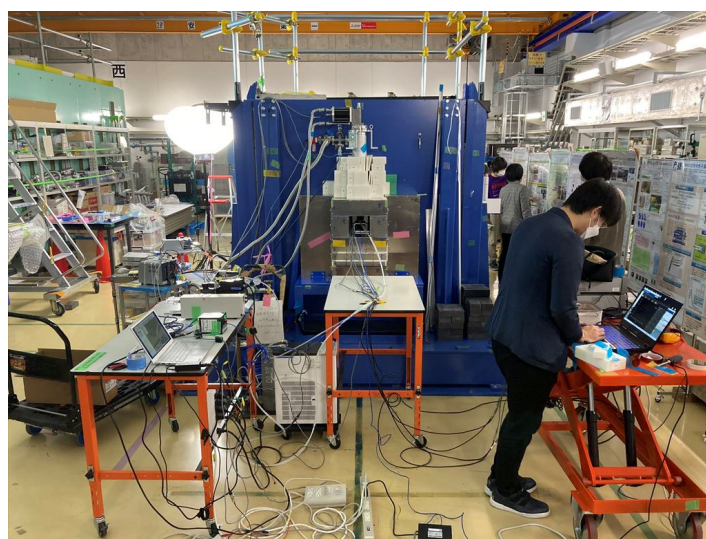


図 3.1-12 RANS 遮蔽体内に高温中性子照射用ホルダーを設置した様子

2つの熱電対のうち、試料ステージ上端に設置した方を温度制御用、太陽電池セル近傍に設置した方を試料温度測定用として、設定温度を 50℃、200℃、300℃と上昇させた際の試料温度測定用熱電対の出力を図 3.1-13 に示す。チェンバー内は常圧の大気である。試料温度は設定温度 5～10 %程度オーバーシュートした後、設定温度を上回って落ち着いた。試料ステージ上面と太陽電池セル近傍では温度勾配が生じていることを示している。実際の使用時にはより試料に近い部分に温度制御用熱電対を設置する必要がある。試料温度を安定的に 300℃以上に保つことが可能であることから、要求仕様の観点からは十分な性能を有していることが明らかになった。本試料ステージを用いて太陽電池セルの高温照射を行った結果については 3.2-3 項で述べる。

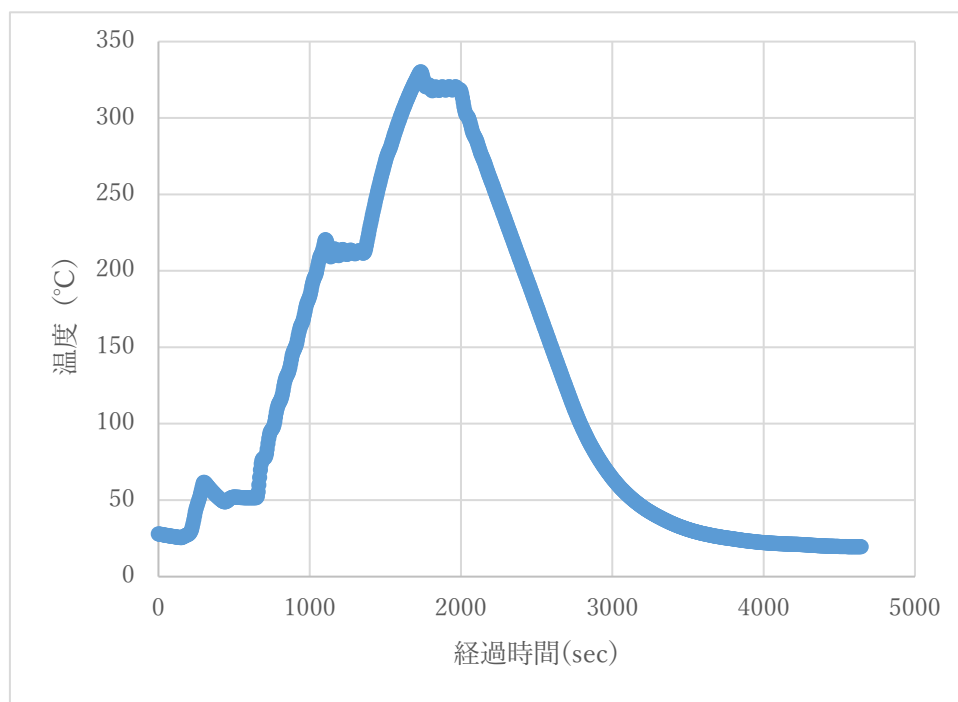


図 3.1-13 試料ステージ昇温結果

(1) Y. Otake (a partial author), M. Uesaka, H. Kobayashi, “Compact Neutron Sources for Energy and Security”, Reviews of Accelerator-Science and Technology ‘Accelerator Applications in Energy and Security’, Vol.08 (2015) 196-198.

(2) Y. Otake, “Fast Neutron Imaging for Non-Destructive Inspection for Social Infrastructures: 高速中性子の応用 - インフラ予防保全 - “レーザー学会誌 レーザー研究, 43(2) (2015) 71-76.

(3) A. Taketani, M. Yamada, Y. Ikeda, T. Hashiguchi, H. Sunaga, Y. Wakabayashi, S. Ashigai, M. Takamura, S. Mihara, S. Yanagimachi, Y. Otake, T. Wakabayashi, K. Kono and T. Nakayama, “Visualization of Water in Corroded Region of Painted Steels at a Compact Neutron Source”, ISIJ Int., 57(1) (2017) 155-161.

(4) Y. Ikeda, M. Takamura, A. Taketani, H. Sunaga, Y. Otake, H. Suzuki, M. Kumagai, Y. Oba, “Prospect for application of compact accelerator-based neutron source to neutron engineering diffraction”, Nucl. Instr. Meth., A833 (2016) 61-67.

(5) T. Kobayashi, S. Ikeda, Y. Otake, Y. Ikeda and N. Hayashizaki, “Completion of a new accelerator-driven compact neutron source prototype RANS-II for on-site use”, Nucl. Instr. Meth., A994 (2021) 165091

(6) T. Sato, Y. Iwamoto, S. Hashimoto, T. Ogawa, T. Furuta, S. Abe, T. Kai, Pi-En Tsai, N. Matsuda, H. Iwase, N. Shigyo, L. Sihver and K. Niita, “Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 3.02”, J. Nucl. Sci. Technol. 55(5-6) (2018) 684-690.

3.2 太陽電池型中性子検出素子の特性解明に関する研究（再委託先：東北大学）

3.2.1 In-situ 測定システムおよび線量解析ソフトの開発

実験により取得した太陽電池型検出素子の特性から電流信号を読み込み、電流信号の値から線量率を解析するソフトウェアを作成した。また、 α 線劣化挙動の結果と中性子計測中の電流信号より、素子の劣化状況を見積もり、線量率を補正するシステムの開発方法を解明した。また、 γ 線補償回路による γ 線信号の簡単な信号除去特性を、2 回路素子の結果と比較することにより検証した。加えて、ボロンコンバータを成膜した太陽電池素子に中性子照射を行い、誘起される電流量を測定し、その原理を検討した。その結果を、以下に記載する。

太陽電池型線量計は、放射線環境中で短絡回路の太陽電池が流す電流量を測定することで線量率を見積もるシステムである。また素子は、p-n 接合によりビルトインポテンシャルを有していることから、発生するキャリアを無電源で取り出せる自立駆動型センサーである。本研究では、InGaP 太陽電池を利用した中性子検出構造を設計することで、素子から流れる電流を、その場測定により測定することで線量計としての特性を評価する。令和 2 年度では、図 3.2.1 に示すような構造の (a) InGaP 太陽電池および、(b) 表面にボロンを設置した中性子検出構造の InGaP 太陽電池を用いて、その中性子検出特性について取得した。その結果、コンバータを簡易に設置する構造では、設置していない素子に比べて、電流信号が顕著に増加し、変換膜表面から放出される α 線を検出できていることが確認された。

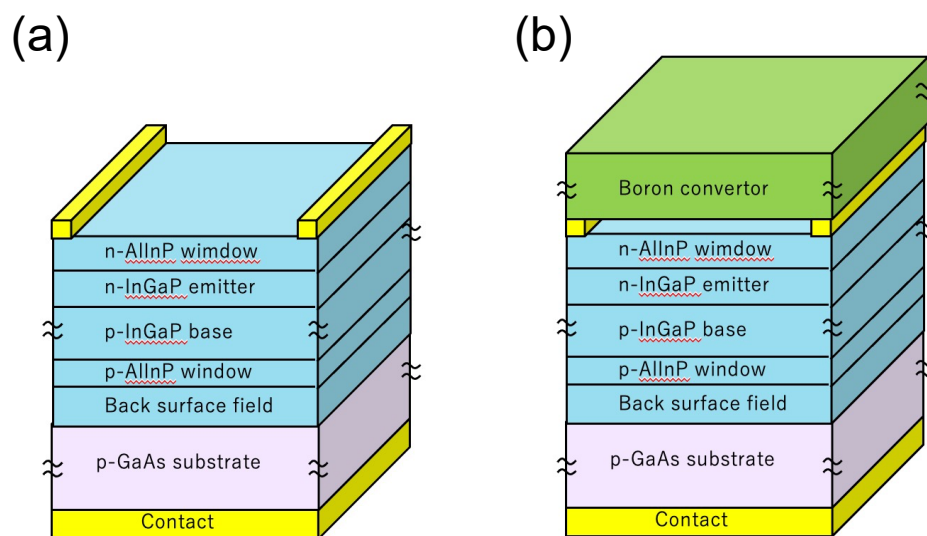


図 3.2-1 InGaP 太陽電池による (a) ガンマ線および (b) 中性子線検出素子構造

令和 3 年度において、この検出メカニズムに関してさらなる解析を実施した。図 3.2-2 (a) に示すような中性子エネルギースペクトルを図 3.2-2 (b) で示すような中性子捕獲断面積を有する ^{10}B で捕獲し、ホウ素から放出される α 線およびリチウム核を InGaP 太陽電池で検出する。RANS から放出される中性子は、速中性子 ($\sim \text{MeV}$) と熱中性子 ($\sim \text{meV}$) の領域の 2 つのピークを有している。 ^{10}B の中性子捕獲断面積は、中性子のエネルギーが低いほど、高くなるため、RANS での InGaP 太陽電池照射位置においては、熱中性子からの信号が主であると考えられる。またホウ素変換膜から放出される α 線のエネルギーは、1.46、および 1.78 MeV のエネルギーを最大とする白色スペ

クトルが形成されている。これは、 $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ 反応から放出される 1.46、および 1.78 MeV のエネルギーを有する単色の α 線が、ホウ素変換膜中で減弱したことが要因である。また、ホウ素中における、これらの α 線の飛程は、およそ 5 μm であることから、その厚みより深いところで発生した α 線は取り出せない。変換膜の膜圧と α 線放出量の関係は、3.3 節で詳しく議論する。図 3.2-3 (b) では、シミュレーションによりアルファ線から InGaP 太陽電池の吸収層へ付与されるエネルギーを 5 MeV にて正規化した電流発生係数として、そのエネルギー依存性を示す。この結果より、InGaP 太陽電池素子は、非常にエネルギーが低いため飛程の短い 0.01 MeV のアルファ線も検出できている。また、最も発電効率が良いエネルギーは、0.3 MeV 付近であり、ホウ素から放出されている α 線を効率よく検出できる特性を有していると考えられる。

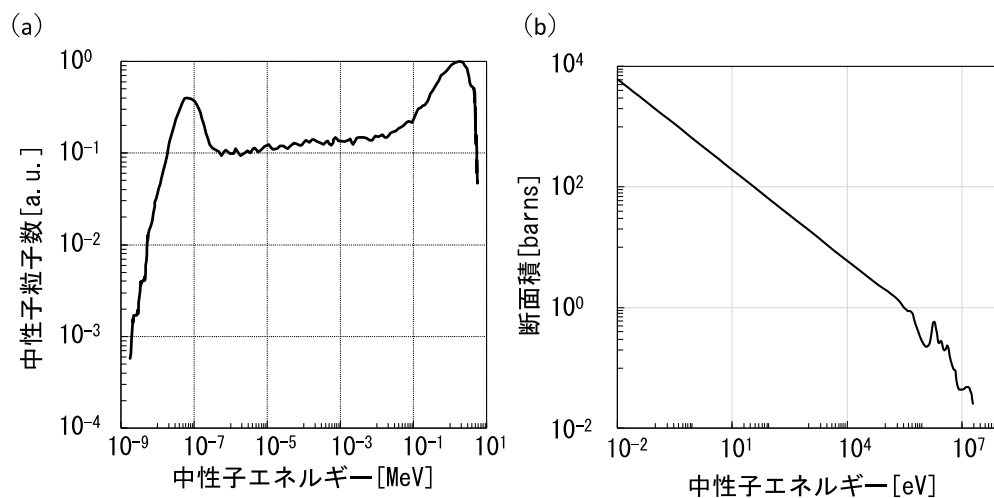


図 3.2-2 (a) InGaP 照射照射位置における中性子スペクトルエネルギースペクトルおよび(b) ^{10}B の中性子捕獲断面積のエネルギー依存性

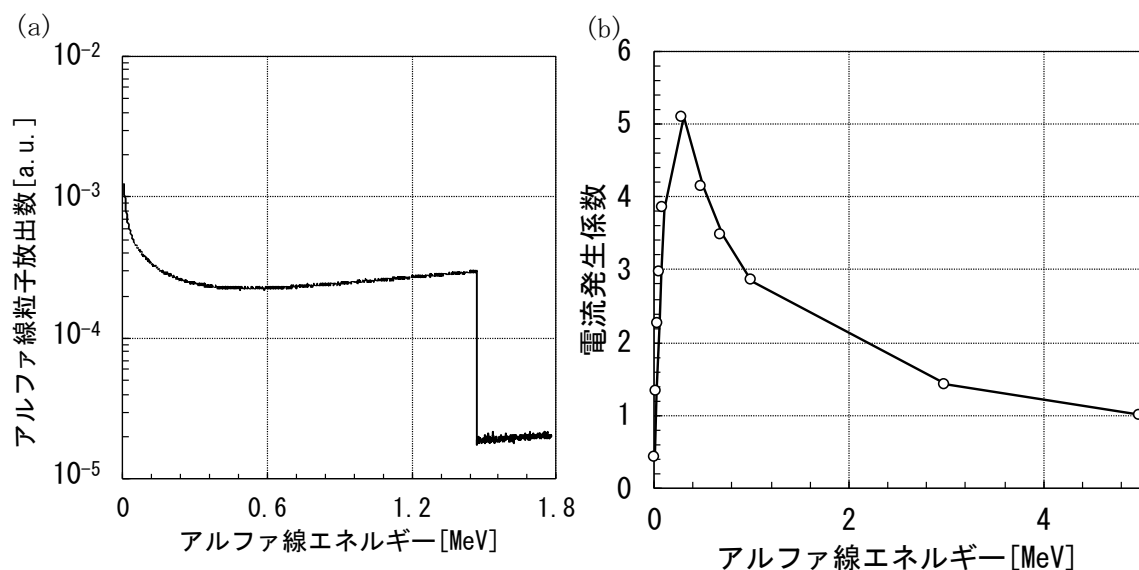


図 3.2-3 (a) InGaP 照射照射位置における中性子スペクトルエネルギースペクトルおよび(b) ^{10}B の中性子捕獲断面積のエネルギー依存性

実験に使用した InGaP 太陽電池およびボロン変換膜の外観を図 3.2-4 に示す。InGaP 太陽電池の面積は、1 cm× 1 cm で、表面には、楕形状の表面電極が作製されており、ボロン変換膜から放出される α 線が InGaP へ入射する際に遮蔽が殆どない構造である。ボロン変換膜は、焼結体を使用しており、密度が 99.9 % (理論密 : 2.08 g/cm³) および純度が 99.9 % である。形状は、切削加工により、1.2 cm× 1.2 cm の面積、0.1 mm の厚さに調整された。変換膜を設置した InGaP 太陽電池は、1 mm×2 mm の表面電極が覆われていない状態であり、この表面電極部分からプローブを用いて回路を接続した。また 3.3 節で詳しく議論するが、照射体型としては、図 3.2-5 に示すように、後方変換法を使用した。これは、裏面電極側から中性子を入射することで、InGaP 太陽電池を通過した中性子を表面電極上に設置したホウ素変換膜で α 線およびリチウム核に変換する。そして、変換された荷電粒子の中で、InGaP 太陽電池の吸収層に入射したものを検出する。前方変換法では、変換膜が 5 μ m 以上では、ホウ素の中性子吸収により中性子が遮蔽されることで、信号が減少する。一方、後方変換法では、ホウ素による遮蔽が無い過程で変換可能であることから、本研究で使用するような 0.1 mm の焼結体を使用する場合には、高効率に中性子を検出できる構造である。加えて、素子中での中性子減衰があるが、ホウ素に比べて十分小さいため、後方変換法が優位である。

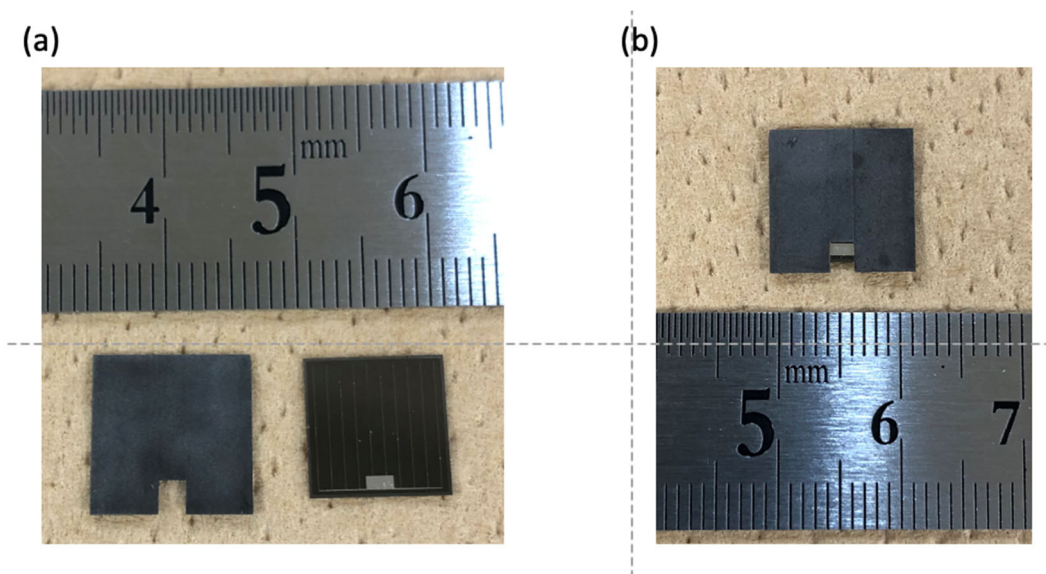


図 3.2-4 (a) InGaP 太陽電池およびボロン変換膜のおよび(b) 変換膜設置後の素子の外観

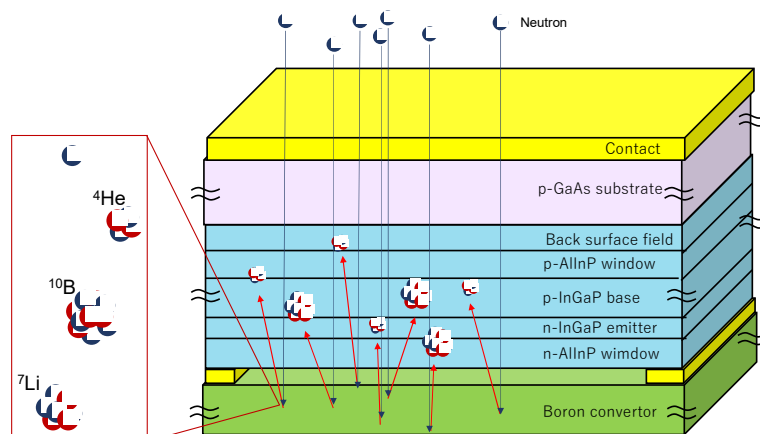


図 3.2-5 InGaP 太陽電池の中性子検出のイメージ

測定体系に関して図3.2-6に示す。太陽電池線量計においては、太陽電池素子をシールドケースに封入し、同軸ケーブルで信号を輸送する必要がある。図 3.2-7 に、シールドケースの外観を示す。シールドケースは、InGaP 太陽電池に合わせて 3D プリンターにより作製された。本試作機は、BNC コネクタで接続できるように設計しており、BNC コネクタを有する同軸ケーブルで延長および配線ボックスへの接続を行った。また、シールド線においては、照射場のグラウンドに接続した。微小電流計として Keysight 社製 B2901A を用いて照射中の素子電流を測定した。

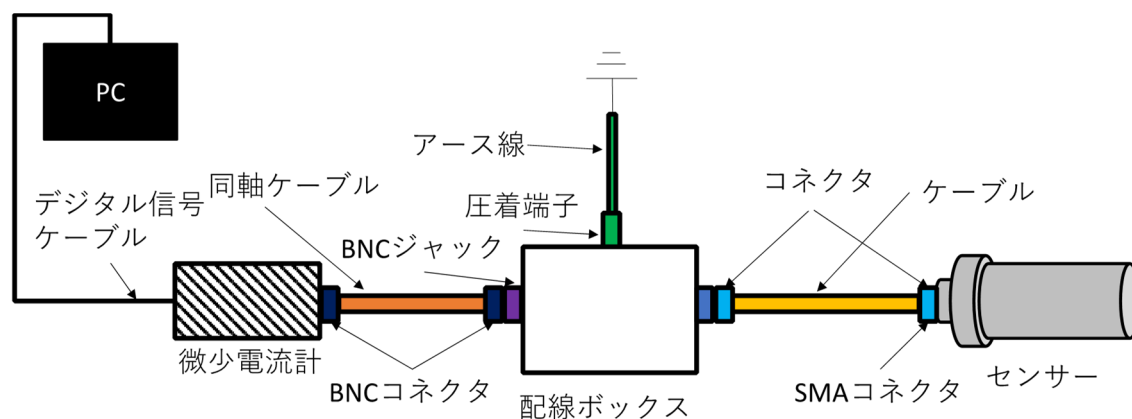


図 3.2-6 太陽電池型線量計の測定体系

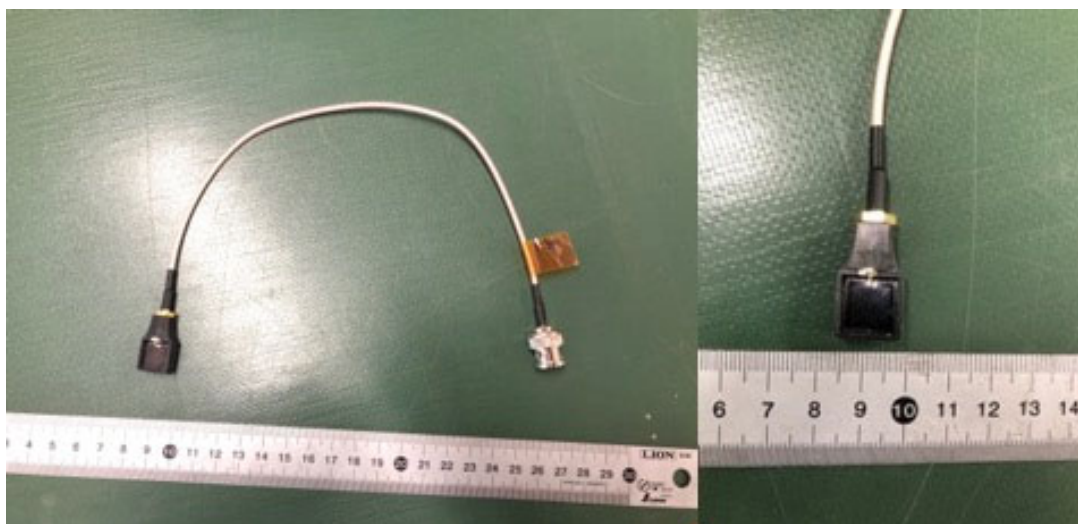


図 3.2-7 InGaP 太陽電池型中性子検出センサーの試作機外観

令和2年度の成果より、RANS 中性子環境中では γ 線からの信号も取得されることから、図3.2-8 に示すように、変換膜あり、および変換膜なしの太陽電池 2 つの素子を同時に測定することで、中性子からの感度を測定する方法を使用している（ γ 線補償回路）。図 3.2-9 に、具体例として太陽電池型線量計ホルダーの写真を示す。このホルダーは、図 3.2-7 に示すセンサーのケースを 2 つ並べて設置できることから、変換膜ありおよび変換膜なしのセンサーを設置した。

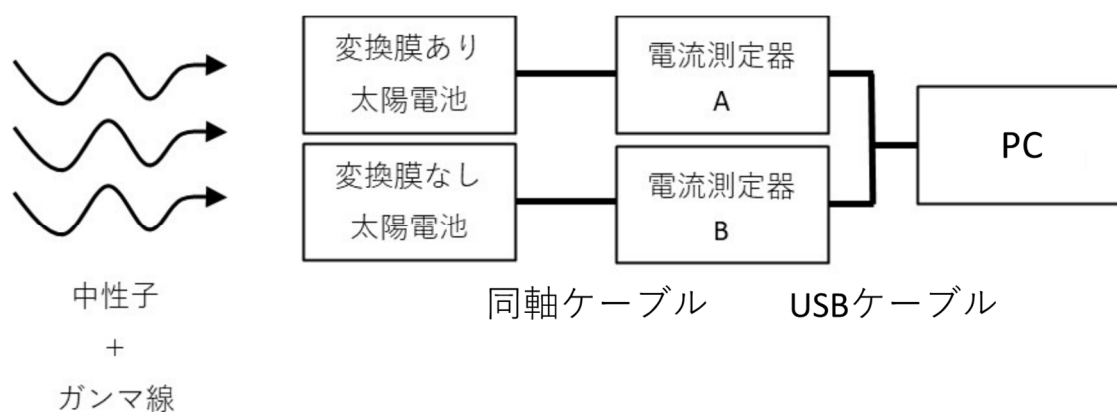


図 3.2-8 RANS 中性子環境中での測定系

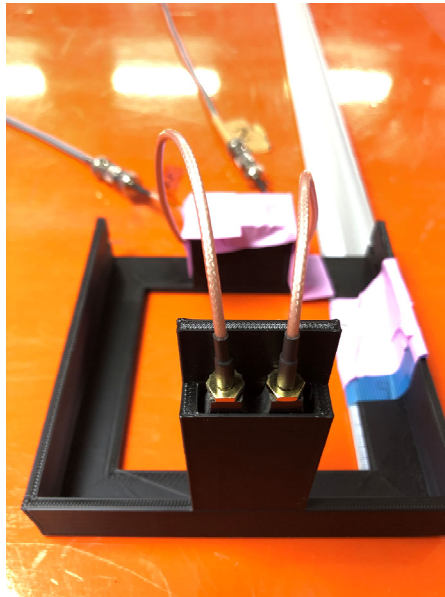


図 3.2-9 太陽電池型線量計ホルダー設置時の写真

このホルダーを用いた体系を RANS 中性子環境へ設置し、中性子フラックスおよび、中性子照射時の変換膜ありおよび、変換膜なしの電流信号の時間応答性を取得した結果（測定実測値）を図 3.2-10 に示す。ここで、中性子フラックスは、RANS 照射体系を、PHITS を用いたモンテカルロシミュレーションにより $100\ \mu\text{A}$ の陽子線電流がベリリウムターゲットに照射した際に InGaP 太陽電池へ入射する中性子数を計算した結果と、実験的にベリリウムターゲットへ入射する陽子線のクーロン数を測定した結果から見積もっている。センサーの電流測定およびビーム電流の積算時間は、1 秒に設定している。この結果より、変換膜ありおよび、変換膜なしのセンサーからの電流信号は、中性子フラックスの増減関係は、およそ一致しているように見える。変換膜ありおよび、なしの結果を比較すると、およそ、100 倍程度変換膜の方が高い電流信号が出力されている。この信号差は、変換膜からの α 線およびリチウム核からの信号によるものであると考えられる。令和 2 年度では、25 倍程度の差が、変換膜ありおよび、なしで観測されていたが、これは、前方変換法の体系で照射試験を行っていたため、変換膜により中性子が減弱したことが要因であると考えられる。また、この結果より、変換膜ありおよび、なしの InGaP 太陽電池素子を応用した中性子センサーの発生電流の中性子フラックス依存性について解析した結果（測定実測値）を図 3.2-11 に示す。それぞれの電流挙動において線形フィッティングにより解析した直線を表記している。この結果より、変換膜ありおよび、なしの両方のセンサーにおいて、中性子フラックスに対して比例的に電流信号が増加していることが明らかとなった。また、変換膜ありの信号と変換膜なしの信号の差が、変換膜から放出される α 線およびリチウム核からの信号を取得できると仮定し、その差から RANS 中性子環境における $1\ \text{cm}$ 各の InGaP 太陽電池センサーの感度を解析した結果、 $4.4 \times 10^{-17}\ \text{A/n}$ の電流挙動を示すことが明らかになった。RANS および原子炉の中性子スペクトルは異なるため、単純な換算では十分な議論はできないが、原子炉環境中では、 $10^{13}\ \text{n/cm}^2$ の中性子場が予測されることから、本センサーにおいて十分な信号が取得できると考えられる。

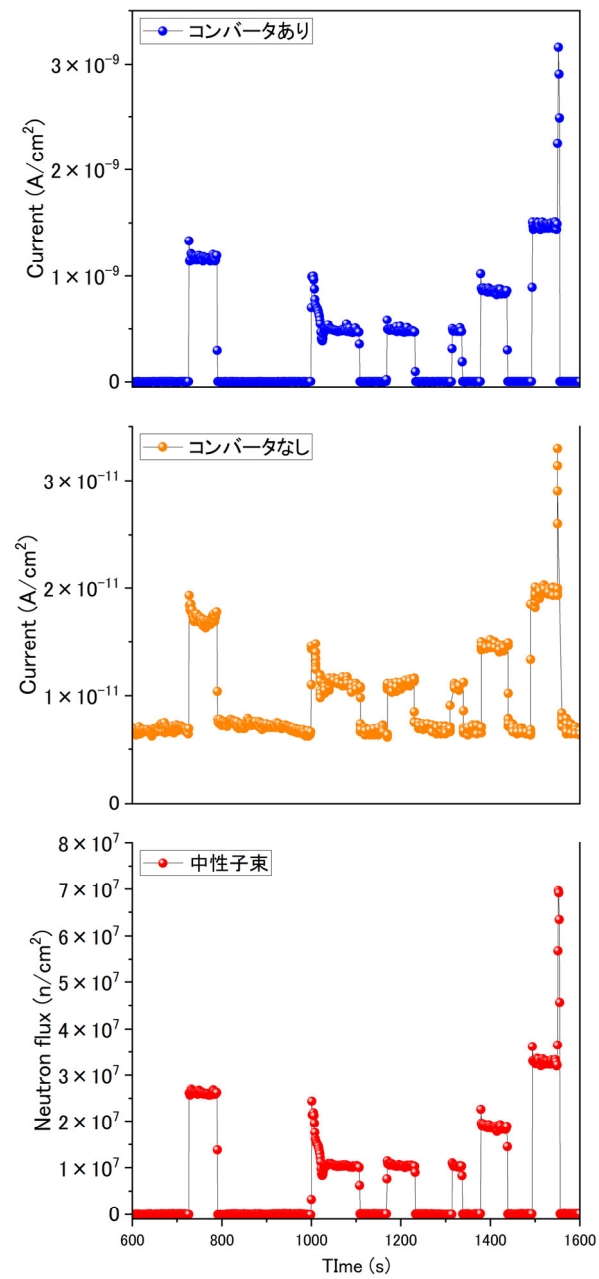


図 3.2-10 中性子照射時の変換膜ありおよび変換膜なしの電流信号と中性子フラックスの関係

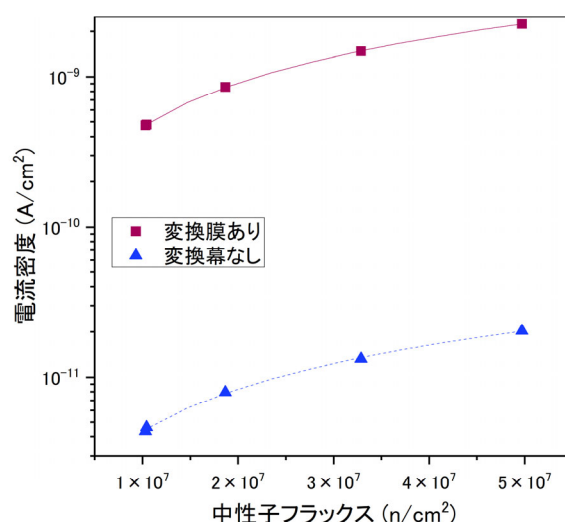


図 3.2-11 変換膜ありおよび、なしの InGaP 太陽電池センサーの発生電流の中性子フラックス依存性

RANS 中性子環境における照射試験では、中性子束の範囲がおおよそ 1 桁しか取得できないため、正確なダイナミックレンジは不明である。そのため、我々は、ダイナミックレンジを正確に測定するため、可視光を使用した構成システムを開発した。可視光源には、635 nm の赤色レーザーを使用した。この波長は、InGaP 太陽電池のバンドギャップの 1.89 eV に近いいため、光の吸収が緩やかであり、膜厚に対しておおよそ均一に電子正孔対が発生すると考えられる。ホウ素からの荷電粒子も InGaP を十分貫通するエネルギーを有していることから、膜厚に対しておおよそ均一な電子正孔対が発生すると考えられる。そのため、バンドギャップのエネルギーに近い光子を用いた光源は、InGaP 太陽電池の放射線誘起電流の挙動解析に有用であると考えられる。図 3.2-12 に可視光による太陽電池誘起電流校正曲線取得装置の概要図を示す。ここでは、発生したレーザー光源は、可変アッテネータにより減弱されて試料へ照射される。また、途中に 2 分岐光学系により均等に分岐した光源はフォトダイオードへ運ばれ、光源の輝度を解析した。このシステムを用いて計測した InGaP 太陽電池の光誘起電流挙動を図 3.2-13 に示す。光強度は、フォトダイオードからの信号を最小の値にて規格化した値である。この結果より、10 pA 以上の電流が InGaP 太陽電池に発生した場合、光輝度に対して比例し、線形的に増加することが確認できる。また線形のダイナミックレンジは、測定できた範囲で、6 桁であり、非常に広いことが明らかとなった。この光挙動特性の結果と図 3.2-11 で取得した中性子照射時の誘起電流挙動を用いて校正曲線を解析した結果を図 3.2-14 に示す。本解析結果は、RANS の環境で発生しているエネルギースペクトルの中性子を用いたものであるが、 10^5 – 10^{12} n/cm² の範囲で中性子束を計測できることが明らかとなった。図 3.2-14 の光誘起電流を利用した校正曲線を元に、電流信号から中性子束を解析するためのソフトウェアを LabVIEW にて作製し、そのインタフェースを図 3.2-15 に示す。本システムでは、モンテカルロシミュレーションによる放射線挙動解析により RANS のスペクトル中性子の感度から 25 meV 中性子感度を推定した結果を用いて、25 meV 中性子に対応した中性子束の値を出力するようになっている。

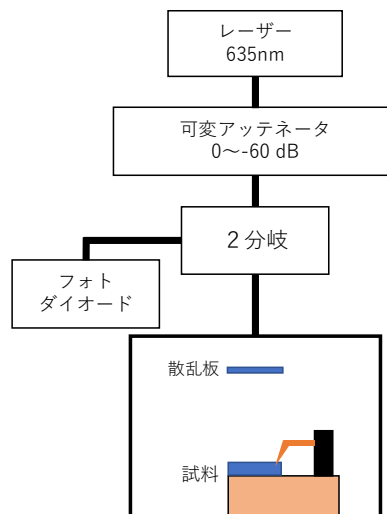


図 3. 2-12 可視光による太陽電池誘起電流校正曲線取得装置の概要図

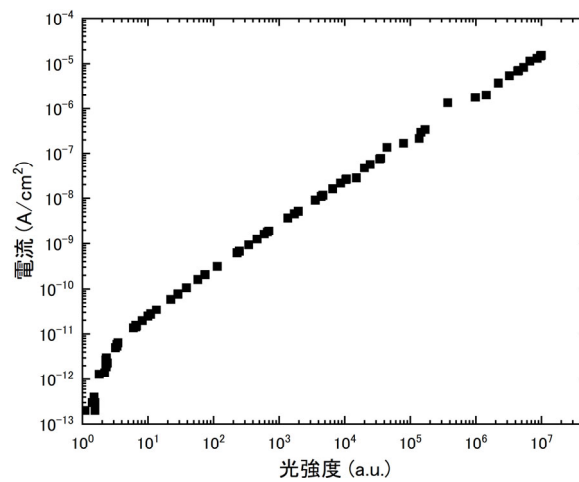


図 3. 2-13 InGaP 太陽電池の光誘起電流の挙動

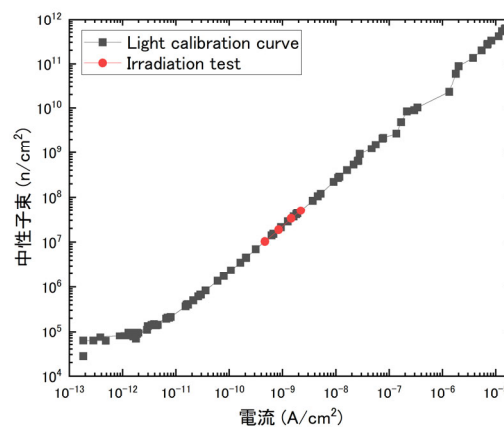


図 3. 2-14 InGaP 太陽電池の光校正曲線と RANS 中性子照射誘起電流の比較

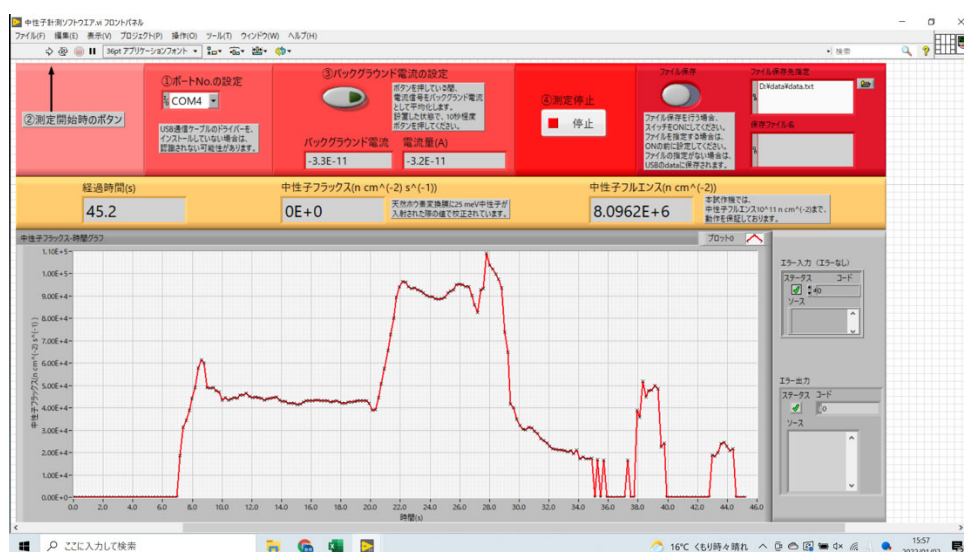


図 3.2-15 InGaP 太陽電池を用いた中性子計測システムのソフトウェア

次に、中性子照射環境下で長時間放射線誘起電流を取得することで劣化挙動を取得した。図 3.2-16 に InGaP 太陽電池を長時間照射した際の誘起電流挙動について示す。この結果より、照射中に劣化が生じ、1 中性子あたりの発生電流量が低下していることが確認できる。この結果から誘起電流の保存率の中性子フルエンス依存性を解析した結果を図 3.2-17 に示す。中性子照射により InGaP 太陽電池中には、 α 線やリチウム核が入射するため、これらの荷電粒子が InGaP 太陽電池の劣化を引き起こしたと考えられる。詳しくは、3.4 節で述べるが、 α 線やリチウム核による太陽電池の劣化挙動は、フルエンスの劣化曲線関数でフィッティングすることが可能である。図 3.2-17 の青破線は、劣化曲線によるフィッティングである。劣化曲線がフルエンスによって決定できることから、図 3.2-18 で示すフローチャートのように、センサーで計測した中性子束を用いることで、センサーの劣化を見積もることが可能となる。図 3.2-19 に、フルエンスにより劣化を見積もり、劣化量分を補正した InGaP 太陽電池の電流信号を示す。この結果より、図 3.2-16 で見られていた電流信号の劣化を補正できていることが確認できる。

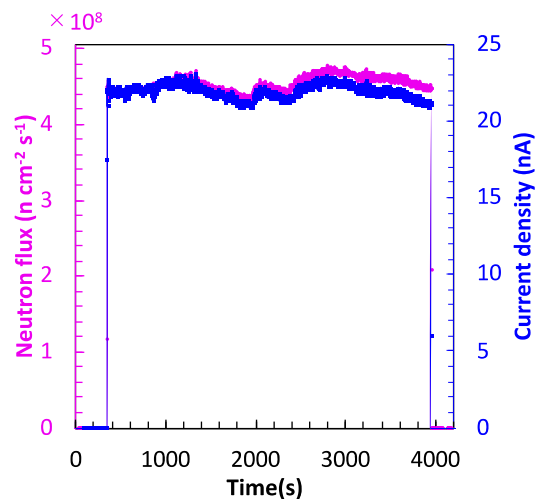


図 3.2-16 InGaP 太陽電池の中性子照射環境下での長時間照射による電流挙動

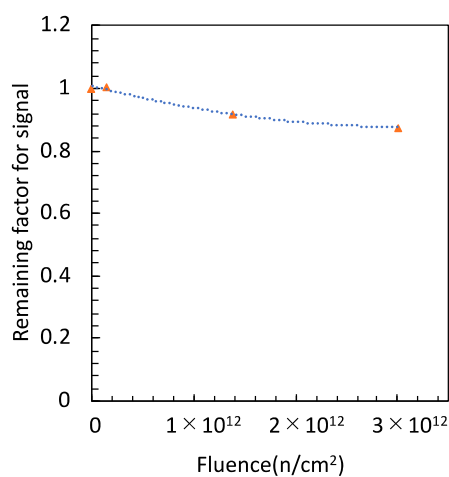


図 3.2-17 InGaP 太陽電池の放射線誘起電流の中性子劣化挙動

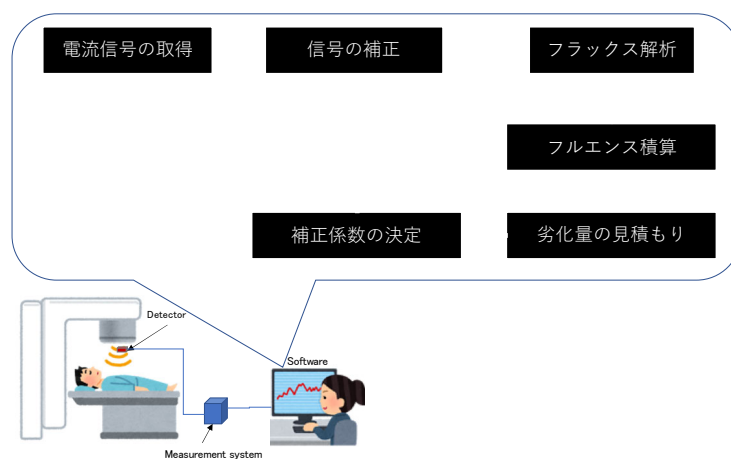


図 3.2-18 InGaP 太陽電池を用いた中性子計測システムにおける劣化補正モデル

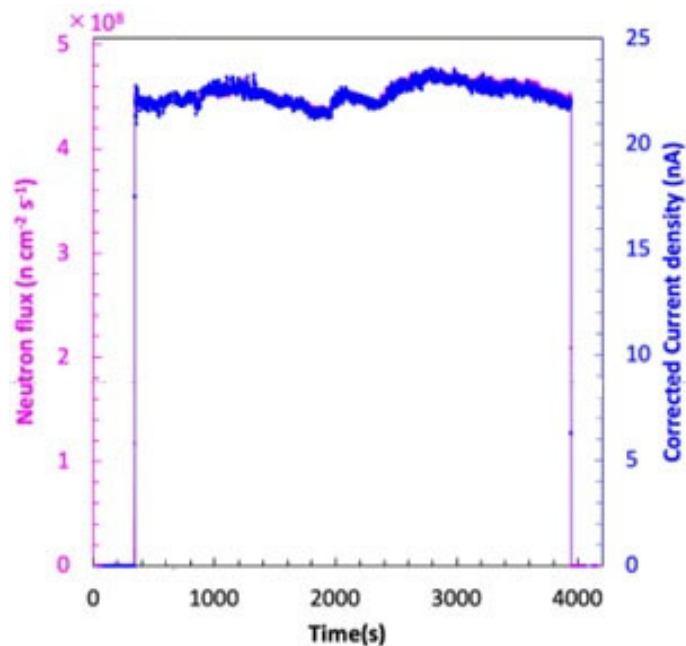


図 3.2-19 劣化補正後の InGaP 太陽電池を用いた中性子環境下での誘起電流挙動

3.2.2 アルファ線誘起電流の解明

He イオン加速器を使用してボロンコンバータより放出される α 線を模擬し、太陽電池素子に照射して誘起される電流量を測定し、その高温における原理を検討した。電流量はイオンフラックスに比例するが、高温における微増分はバンドギャップ幅減少に起因すると考えられる。結果の詳細について以下に記載する。

タンデム加速器を用いた He イオンビームによる InGaP 太陽電池の誘起電流挙動特性を解析した結果を記載する。イオンビームの照射は、真空チャンバー中で行うため、専用のその場測定用の治具を設計する必要がある。高温照射試験では、QST のイオンビーム照射施設 TIARA にある MT チャンバーを使用した。MT チャンバーに専用に設計した太陽電池のその場測定治具を図 3.2-20 に示す。図 3.2-20(a) では、高温照射ホルダーの外観を示しており、上部には、ビーム電流を計測するファラデーカップ、中部には、InGaP 太陽電池を設置する治具、下部には、ビーム形状を観測するセラミック蛍光板を設置している。図 3.2-20 (b) に示すように中部の治具には、プローブを設置しており、イオンビーム照射中の InGaP 太陽電池の誘起電流をその場測定可能である。また、治具背面には、電子線ヒーターおよび抵抗加熱ヒーターを設置しており、試料を 300 °C まで加熱することができる。タンデム加速器を用いて 5 MeV He イオンを InGaP 太陽電池へ照射した結果を図 3.2-21 に示す。試料温度は 20、100、200 および、300 °C であった。この結果より、各温度において He イオンのフラックスに比例して誘起電流が同様に増加することが確認された。 γ 線照射試験の結果でも確認されているが、温度の増加に伴い、誘起電流の微少な増加も確認されている。

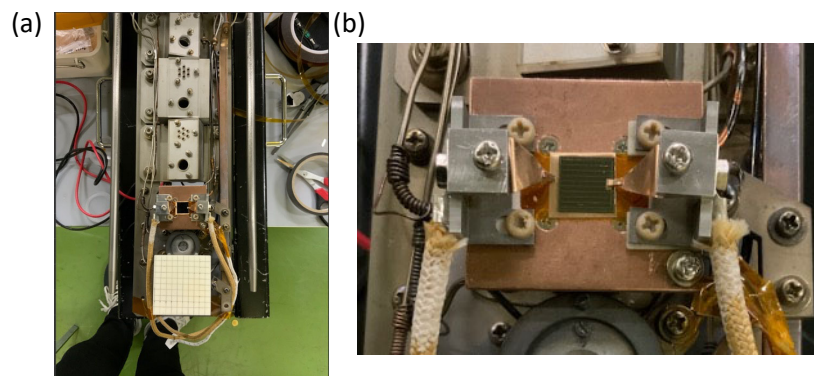


図 3.2-20 MT チャンバーにおける InGaP 太陽電池のその場測定用治具

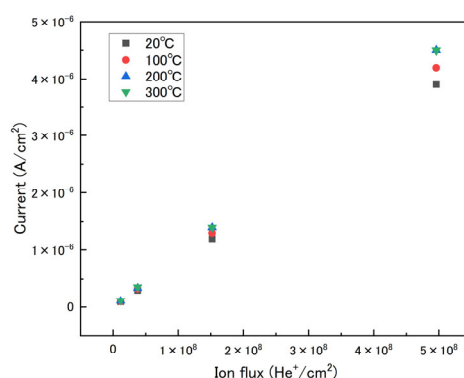


図 3.2-21 高温環境下における InGaP 太陽電池のヘリウムイオン誘起電流挙動

3.2.3 中性子誘起電流の解明

ボロンコンバータを成膜した太陽電池素子に中性子照射を行い、誘起される電流量を測定し、その原理を検証した。測定結果並びに温度上昇による増加の原理に関する考察を以下に記載する。

高温場における InGaP 太陽電池を用いた中性子検出素子の検出特性についての実験を行った。高温照射試験を実施するためには、理化学研究所で開発した高温照射ホルダーに適合するその場測定用の治具を開発する必要があった。そのため、図 3.2-22 に示すようなプローブ付きの治具を作製し、その上に InGaP 太陽電池を設置することで、高温場における中性子照射時の発電特性を取得した。図 3.2-23 では、高温ホルダーを用いてホウ素変換膜を設置した InGaP 太陽電池の 20 °C および 275 °C における中性子検出特性の結果を示す。高温照射用のホルダーでは、InGaP 太陽電池の設置方向を自由に変更することができないため、効率が落ちる前方変換法にて照射試験を行った。そのため、絶対値としての解析ではなく相対値として、各温度における陽子線電流に対する電流発生量の変化として解析を行う。その結果より、高温環境下での InGaP 太陽電池の発電特性は、室温と比較して次項で詳細に検討する暗電流分が上乘せされているものの傾きが変わっておらず、ほとんど同じであることが明らかとなった。また、用いた高温ホルダーでは、ヒーター ON にした場合、ヒーター電源からのノイズが InGaP 太陽電池の測定系へ流入するため、誘起電流の標準偏差が大きくなった。一般的に、高温場では、半導体中のバンドギャップが小さ

くなるため、電子正孔対の生成エネルギーが低下することにより電流が増加することが予想される。本結果では、ノイズが大きいいため十分な議論は難しいが、275 °Cと 20 °Cの電流挙動において、信号が微増しているとも見られる。詳細な、放射線誘起電流の高温挙動については、 γ 線照射により取得することで議論する。

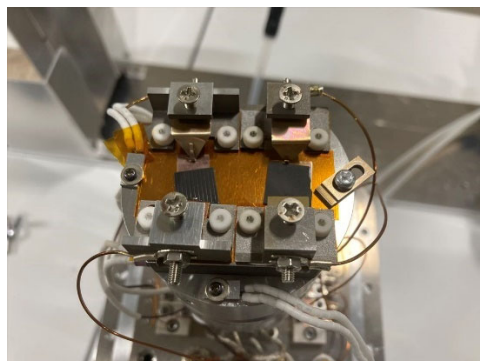


図 3. 2-22 高温場での中性子照射時のその場電流測定用治具の写真

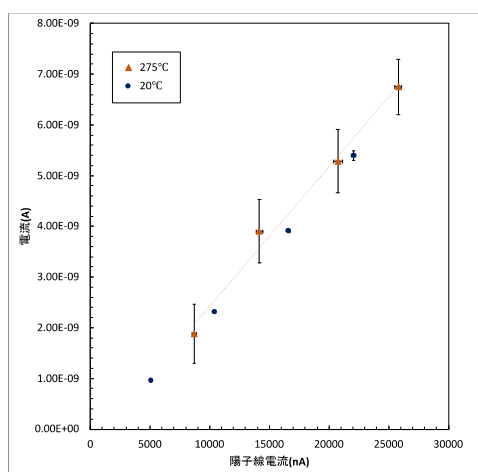


図 3. 2-23 20 °Cおよび 275 °Cにおける中性子検出特性

3. 2. 4 ガンマ線誘起電流の解明

太陽電池素子に γ 線照射を行い、誘起される電流量を測定してその原理を検証した。測定結果並びに温度上昇による増加の原理に関する考察を以下に記載する。

放射線環境中における、発生キャリアの増加を解析するため、低ノイズな高温チャンバーを作製し、 γ 線環境中にて照射試験を実施した。図 3. 2-24(a)に示す令和 2 年度に導入した高温真空用チャンバーを、令和 3 年度では、図 3. 2-14(b)に示すように太陽電池の電流を取得できるようにプローブを作製し、高温試料ホルダーに設置した。このプローブを利用して、InGaP 太陽電池の放射線誘起電流を測定できる。InGaP 太陽電池を設置した高温ホルダーを QST のコバルト-60 γ 線の照射施設である食品照射棟にて設置した。線源から 50 cm の距離で 1 kGy/h の γ 線を照射中の γ 線誘起電流の温度依存性について取得した。図 3. 2-25(a)に γ 線誘起電流の温度依存性について示す。この結果より、誘起電流は、温度に比例して増加しており、300 °Cでは、20 °Cと比較して、およそ 4 %程度の信号増加が確認された。これは、高温環境下で、InGaP のバンドギャップが小さくなり、発生する電子正孔対が増加することに起因していると考えられる。ただ増

加の割合は、非常に小さいので、センサー挙動としての影響は小さいと考えられる。また、放射線誘起電流測定中の電流のゆらぎを標準偏差として解析した結果を図 3. 2-25 (b) に示す。この結果より、放射線誘起電流のゆらぎは、温度に対してほとんど依存しないことがわかる。しかし、図 3. 2-25 (c) に示すように InGaP 太陽電池の暗電流特性は、温度に対して大きく影響を受けており、20～200 °C の範囲でおおよそ、2 桁の増加が生じた。放射線誘起電流は、暗電流と照射中の誘起電流の差によって算出される。そのため、誘起電流計測中に、温度が大きく変化した場合、暗電流の増減が生じるため、測定に誤差を与えることが考えられる。そのため、InGaP 太陽電池を高温用センサーとして運用するためには、センサーの使用温度を測定することで暗電流の増加を補正することが必要であると考えられる。

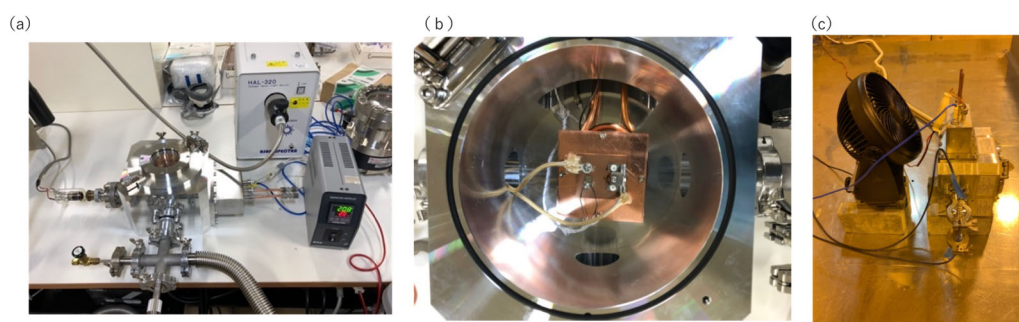


図 3. 2-24 (a) 高温チャンバー外観 (b) 電流測定用プローブ (c) ガンマ線照射試験

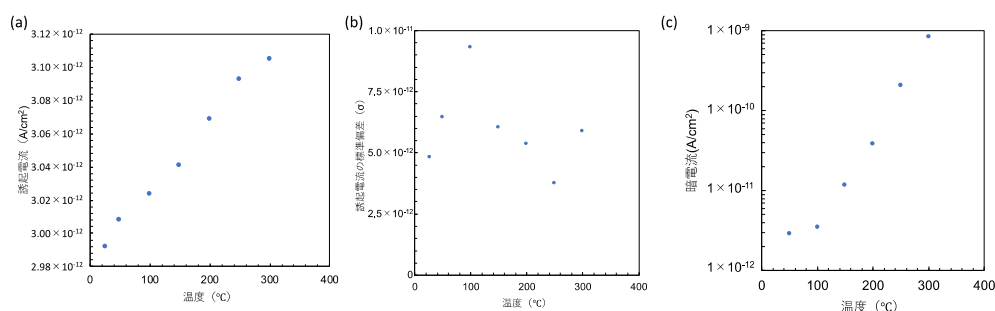


図 3. 2-25 InGaP 太陽電池の高温場における (a) ガンマ線誘起電流挙動 (b) 誘起電流の標準偏差 (c) 暗電流

次に、高温環境下の測定で温度による素子の劣化に関する評価を行った。中性子照射時、He イオン照射時、 γ 線照射時の高温チャンバーでは、真空環境下で試料を設置していた。そのため図 3. 2-24 (a) に示している高温チャンバーを用いて、 10^{-4} torr 程度の真空環境中における高温劣化挙動について取得した。高温試験は、300 °C で 20 時間行った。劣化の解析方法は、暗電流電圧特性および、静電容量—電圧特性を取得した。図 3. 2-26 に高温試験前後における暗電流電圧特性の変化を示す。この結果より、試験前後において特性が変化している事がわかる。低電圧印加時に電流がより流れていることから、リーク電流が増加したと考えられる。しかし、電流が急激に流れ始める、しきい値電圧においては、ほとんど変わらないように見える。そのため、図 3. 2-27 に示すように高温試験前後における静電容量—電圧特性を取得した結果、試験前後ではほとんど違いが見られなかった。静電容量電圧特性は p-n 接合内部のドーパントの拡散状況や、ビルトインポテンシャルの変化の影響を受ける。そのため、この結果から高温照射試験では、InGaP 太陽電池の p-n 接合に影響を及ぼすような劣化はなかったと考えられる。一方、暗電流電

圧特性の変化は、試験中に生じた表面の酸化やコンタミネーションの影響を受けていると考えられる。

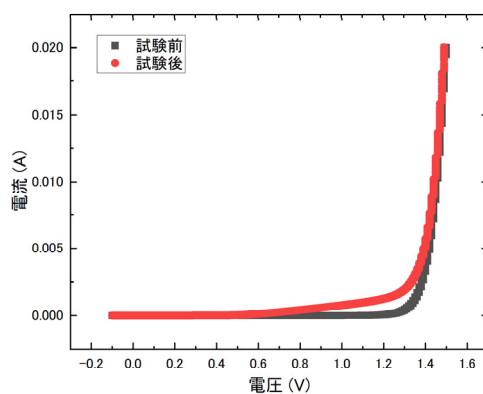


図 3.2-26 高温試験前後における暗電流電圧特性の変化

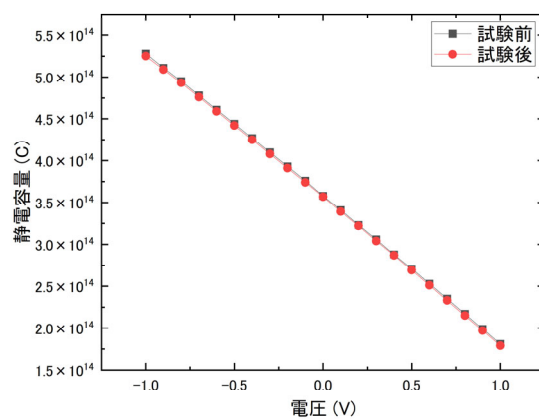


図 3.2-27 高温試験前後における静電容量—電圧特性の変化

3.3 中性子／アルファ粒子変換膜構造最適化に関する研究（再委託先：木更津高専）

まず、太陽電池型線量計に求められる中性子コンバータ膜の厚さを明らかにするために、PHITS を用いて α 線放出の膜厚依存性の計算を行った⁽⁶⁾。図 3.3-1 に密度 100 %の窒化ホウ素 (BN) で計算した α 線放出の膜厚依存性を示す。この図より、表面側、裏面側ともに 5 μm 程度までは膜厚の増加に伴い α 線放出量が増加している。これは膜厚の増加により中性子線吸収量が増加するためと考えられる。しかし、5 μm を超えると、表面側では α 線放出量が飽和し、裏面側では α 線放出量が低下することがわかった。このことから 5 μm 程度の膜厚が最適であることがわかる。この最適な膜厚は α 線の飛程程度であり、飛程より膜厚が小さいと吸収される中性子が不十分であり、膜厚が大きすぎると中性子コンバータ自身の遮蔽効果で α 線放出量が小さくなるためであると考えられる。このため、中性子コンバータ膜の膜厚制御が重要となる。

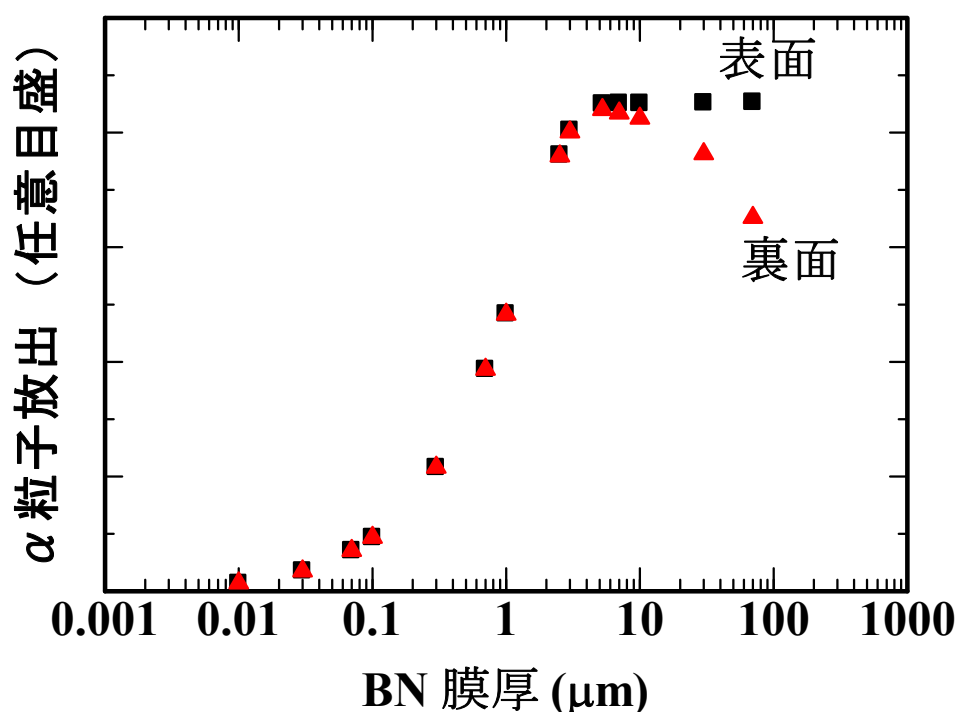


図 3.3-1 密度 100%の窒化ホウ素 (BN) で計算したアルファ線放出の膜厚依存性

令和 3 年度はまず、スパッタリング法を用いて LiF 膜の成膜を試みた。成膜にはエイコーエンジニアリング製のリボルバー式 RF スパッタ装置を用いた。ターゲットには LiF (純度：3N) を用いた。Ar 雰囲気中で RF 電力 100 W、基板温度を室温としてガラス基板 (Corning Eagle XG) 上に成膜を行った。しかし、成膜を観測することができなかった。このことから、目標としている数 μm の膜厚を得るには、成膜速度が極めて遅く、この装置では成膜が困難であると判断した。

次に、真空蒸着法により LiF 膜の成膜を試みた。タングステンボートに 0.2 g の LiF を充填し、基板温度を室温としてガラス基板 (Corning Eagle XG) 上に成膜を行ったところ、60 nm 程度の LiF 膜が得られた。こちらについても、目標としている数 μm の膜厚を得るには、成膜速度が極めて遅く、この装置では成膜が困難であると判断した。

以上のように、スパッタリング法、真空蒸着法ともにLiFの成膜速度が小さく、数 μm の膜厚を得ることが容易ではないと判断した。ホウ素化合物については蒸気圧の低さを考えるとLi化合物以上に数 μm の膜厚の成膜は困難であることが想定されるため、スクリーン印刷法に注力することとした。

スクリーン印刷法により B_4C 膜およびLiF膜の成膜を試みた。まず、バインダーに加熱硬化型エポキシ樹脂を用いて、 B_4C 粉末およびLiF粉末を用いてガラス基板(Corning Eagle XG)上にスクリーン印刷を行った。用いた B_4C 粉末、LiF粉末ではB、Liの濃縮は行っておらず、天然のB、Liを用いている。図3.3-2に用いたスクリーン印刷装置の外観を示す。この装置を用いて手刷りで印刷を行った。ガラス基板上に印刷後に、大気中で150℃で20分間加熱した。この手法で成膜した B_4C 膜の外観を図3.3-3に示す。ガラス基板の大きさは10cm角である。この図のように均一な膜が得られている。

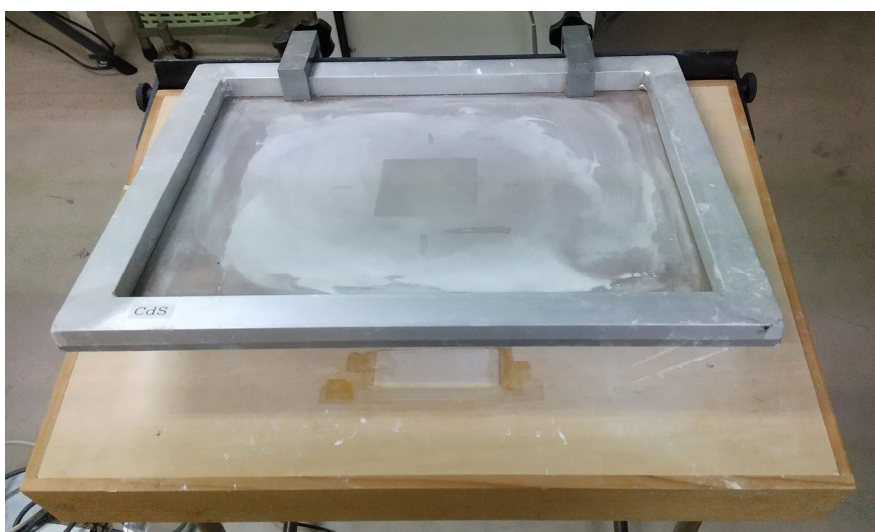


図 3.3-2 本研究で用いたスクリーン印刷装置の外観



図 3.3-3 加熱硬化型エポキシ樹脂をバインダーに用いて作製した B_4C 膜の外観

次に X 線回折法により作製した B_4C 膜および LiF 膜の評価を行った。図 3.3-4 に B_4C 膜および LiF 膜の X 線回折パターンを示す。この図では、加熱硬化型エポキシ樹脂と原料粉末の比率を変化させた試料を評価している。 B_4C 膜および LiF 膜の X 線回折パターンにはそれぞれ B_4C および LiF の回折ピークが明確に観測されており、 B_4C 膜および LiF 膜が得られていることが確認できる。また、 29° 付近、 47° 付近に不明なピークが観測されているが、これは加熱硬化型エポキシ樹脂のみで作製した膜で観測されており、加熱硬化型エポキシ樹脂によるピークと考えられる。 B_4C 膜および LiF 膜ともに、加熱硬化型エポキシ樹脂の比率が小さくなると加熱硬化型エポキシ樹脂からの回折ピークの強度が小さくなっている。しかし、加熱硬化型エポキシ樹脂の比率を小さくすると機械的強度が小さくなり、この図の(c)以下に加熱硬化型エポキシ樹脂の比率を小さくするとピンセットで触れただけで剥離してしまうことがわかった。

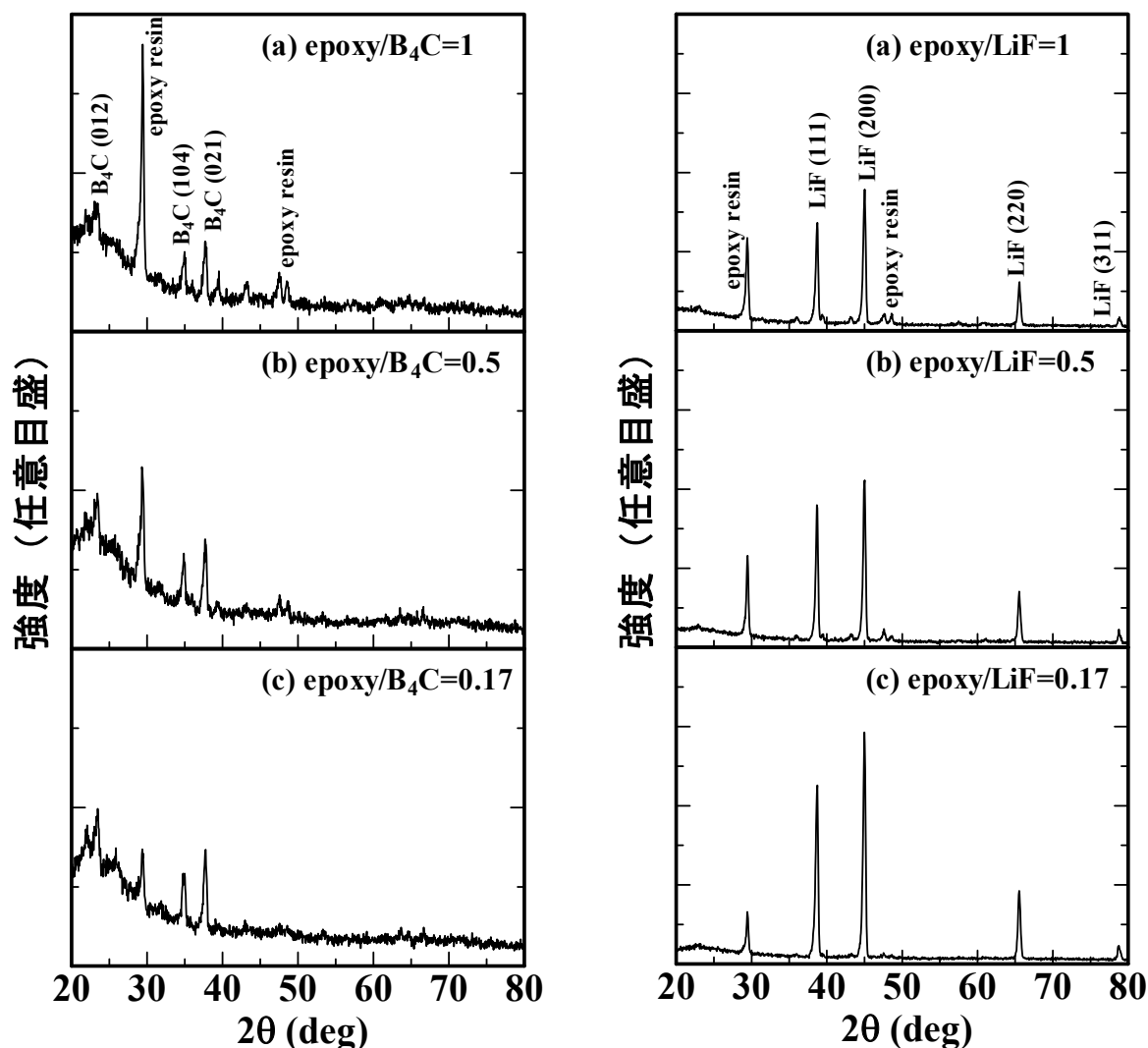


図 3.3-4 加熱硬化型エポキシ樹脂をバインダーに用いて作製した B_4C 膜および LiF 膜の X 線回折パターン

次に、作製した中性子コンバータ膜と InGaP 太陽電池を組み合わせ、中性子線照射試験を実施した。B₄C 膜、LiF 膜の厚さはそれぞれ約 40 μm 、約 120 μm である。1×1 cm^2 の InGaP 太陽電池表面上に、0.8×1 cm^2 の B₄C 膜および LiF 膜を接触させた。電極を取り出す方法について検討を行い、ガラス基板上にコンバータ膜を成膜して太陽電池と接触させるという方法を用いて電極取り出しにコンバータが影響を与えないようにした。中性子照射には、理化学研究所の RANS を用いた。図 3.3-5 に示すように、中性子線はコンバータの厚さの影響がないように InGaP 太陽電池側から照射した。図 3.3-6 に加熱硬化型エポキシ樹脂をバインダーに用いて作製した B₄C 膜を有した InGaP 太陽電池の中性子照射時の誘起電流を示す。バインダーを有していない場合には中性子照射時にわずかに誘起電流が観測されているがこれは中性子と同時に発生している γ 線による誘起電流である。B₄C 膜を有している場合には中性子線照射による誘起電流が明確に観測されている。このことから、B₄C コンバータから出力されるアルファ線を検出できていることがわかる。図 3.3-7 に B₄C 膜および LiF 膜を有した InGaP 太陽電池の誘起電流と陽子線電流の関係を示す。この図より、誘起電流は陽子線電流に比例しており、中性子束モニタとして使用できることがわかる。

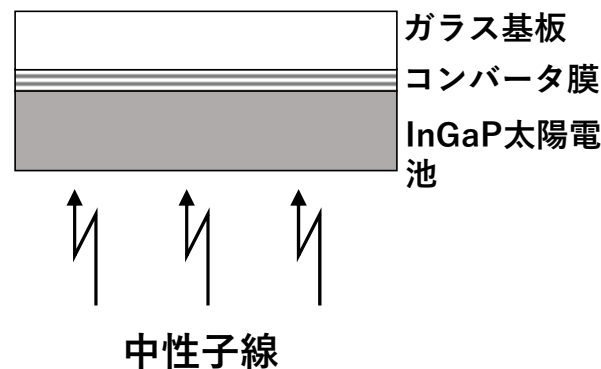


図 3.3-5 中性子コンバータ膜を有した InGaP 太陽電池への中性子線照射方法

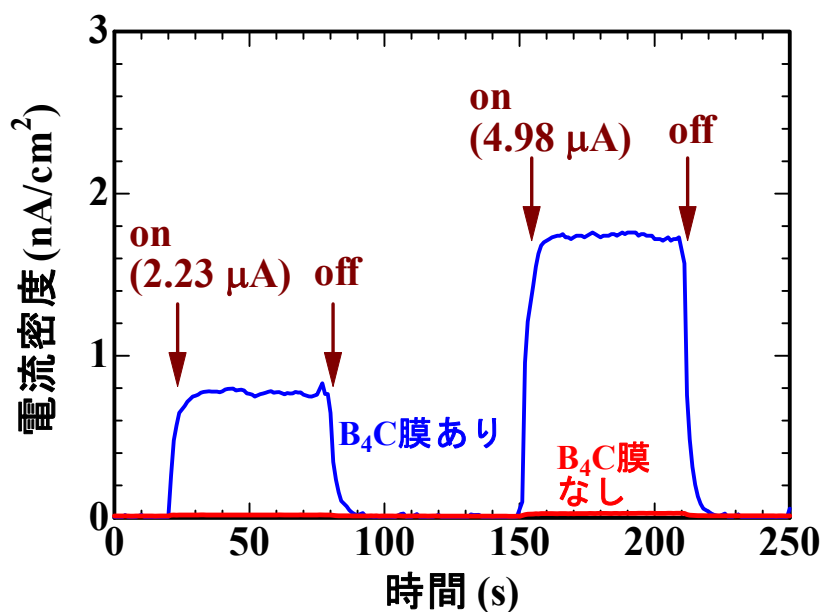


図 3.3-6 加熱硬化型エポキシ樹脂をバインダーに用いて作製した B₄C 膜を有した InGaP 太陽電池の中性子照射時の誘起電流

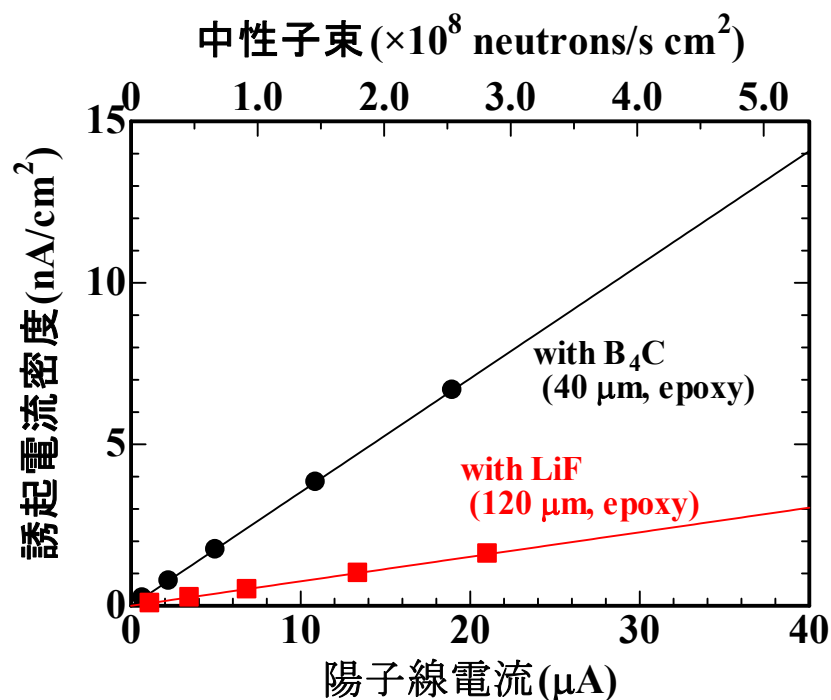


図 3.3-7 加熱硬化型エポキシ樹脂をバインダーに用いて作製した B₄C 膜および LiF 膜を有した InGaP 太陽電池の誘起電流と陽子線電流

次に、耐熱性を考慮してアクリルバインダー（OLYCOX KC-1700P、共栄社化学株）を用いて中性子コンバータ膜を作製した。このアクリルバインダーでは 300 °C で焼結するため、300 °C 程度の耐熱性が期待できる。このアクリルバインダーと B₄C 粉末および LiF 粉末と混合してガラス基板 (Eagle XG) 上にスクリーン印刷し、300 °C で 15 分間加熱して B₄C 膜、LiF 膜を作製した。B₄C 粉末および LiF 粉末では天然の B, Li が用いられている。B₄C 膜、LiF 膜の厚さはそれぞれ約 40 μm、約 25 μm である。図 3.3-8 および図 3.3-9 にこの手法で成膜した B₄C 膜および LiF 膜の外観を示す。アクリルバインダーを用いた場合にも均一な膜が得られている。

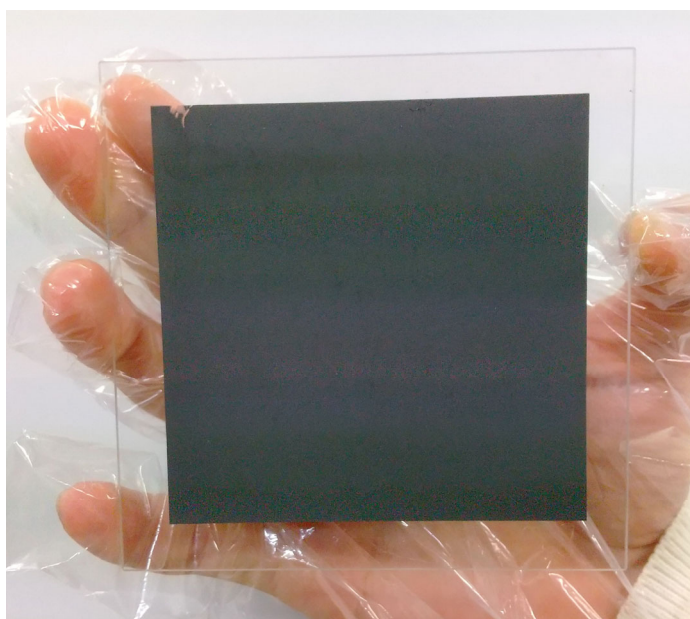


図 3.3-8 アクリルバインダーを用いて作製した B₄C 膜の外観

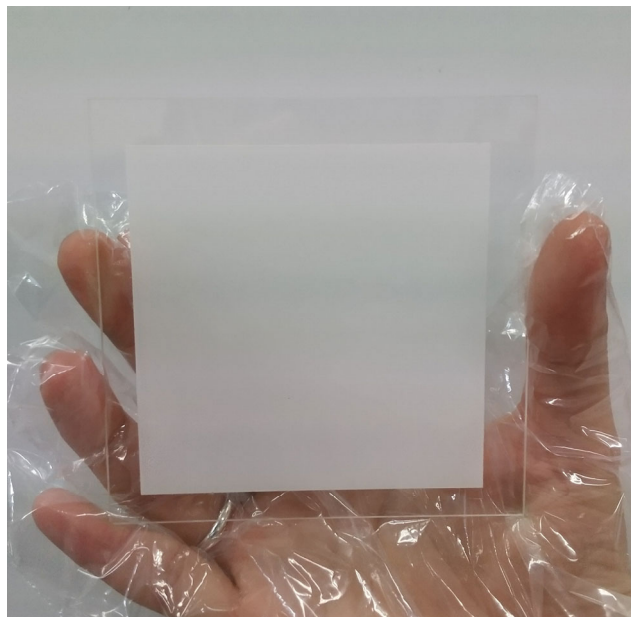


図 3.3-9 アクリルバインダーを用いて作製した LiF 膜の外観

図 3.3-10 にアクリルバインダーを用いて作製した B_4C 膜および LiF 膜の X 線回折パターンを示す。この場合にも B_4C および LiF の回折ピークが明確に観測されており、 B_4C 膜および LiF 膜が得られていることが確認できる。

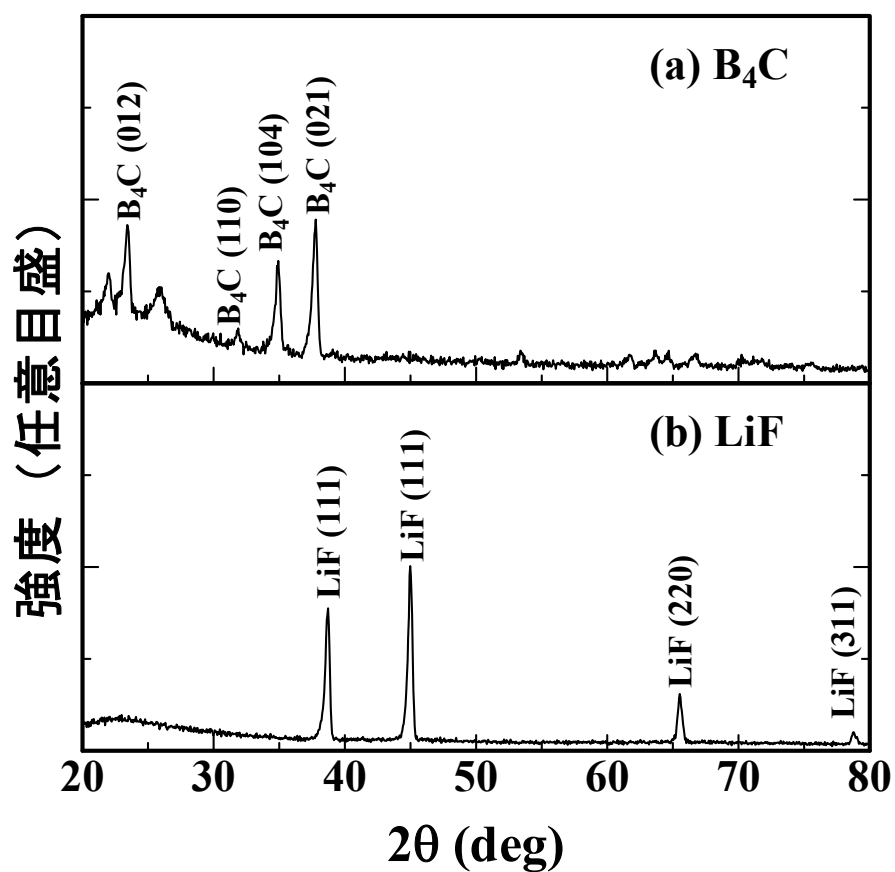


図 3.3-10 アクリルバインダーを用いて作製した B_4C 膜および LiF 膜の X 線回折パターン

次に、中性子照射試験を実施した。この場合にも、理化学研究所の RANS を用い、中性子線はコンバータの厚さの影響がないように InGaP 太陽電池側から照射した。図 3.3-11 にアクリルバインダーを用いて作製した B_4C 膜を有した InGaP 太陽電池の中性子照射時の誘起電流を示す。この場合にも B_4C 膜を有している場合には中性子線照射による誘起電流が明確に観測されている。図 3.3-12 に B_4C 膜および LiF 膜を有した InGaP 太陽電池の誘起電流と陽子線電流の関係を示す。この図より、誘起電流は陽子線電流に比例しており、中性子束モニタとして使用できることがわかる。

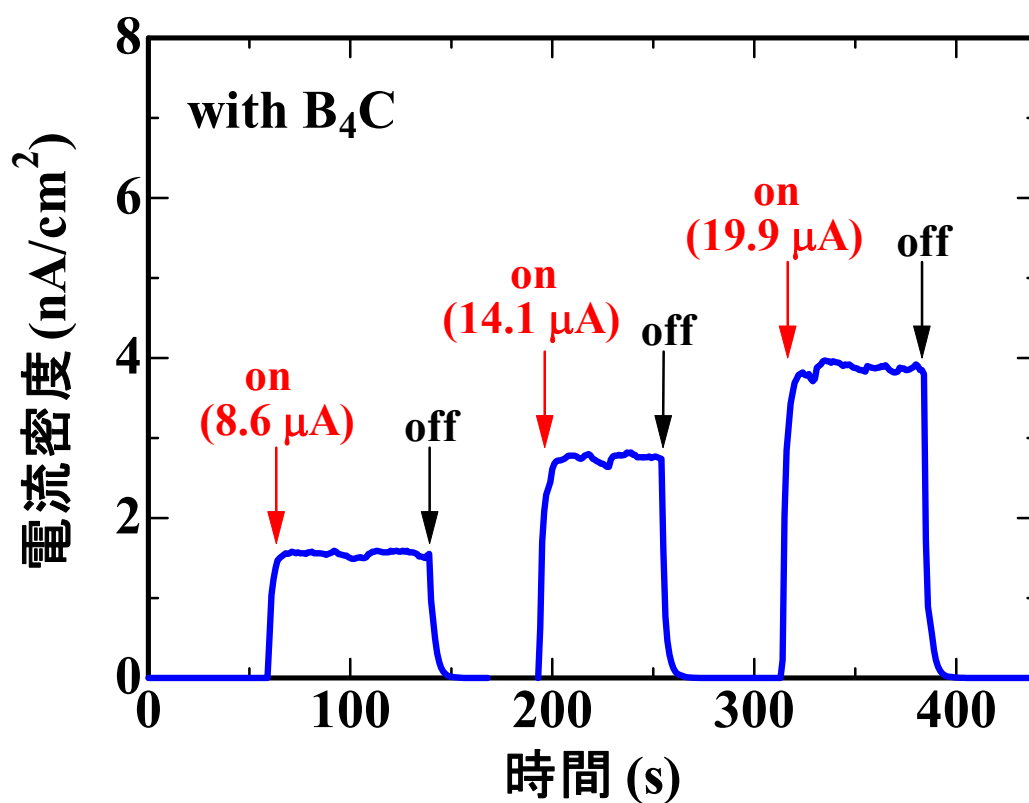


図 3.3-11 アクリルバインダーを用いて作製した B_4C 膜を有した InGaP 太陽電池の中性子照射時の誘起電流

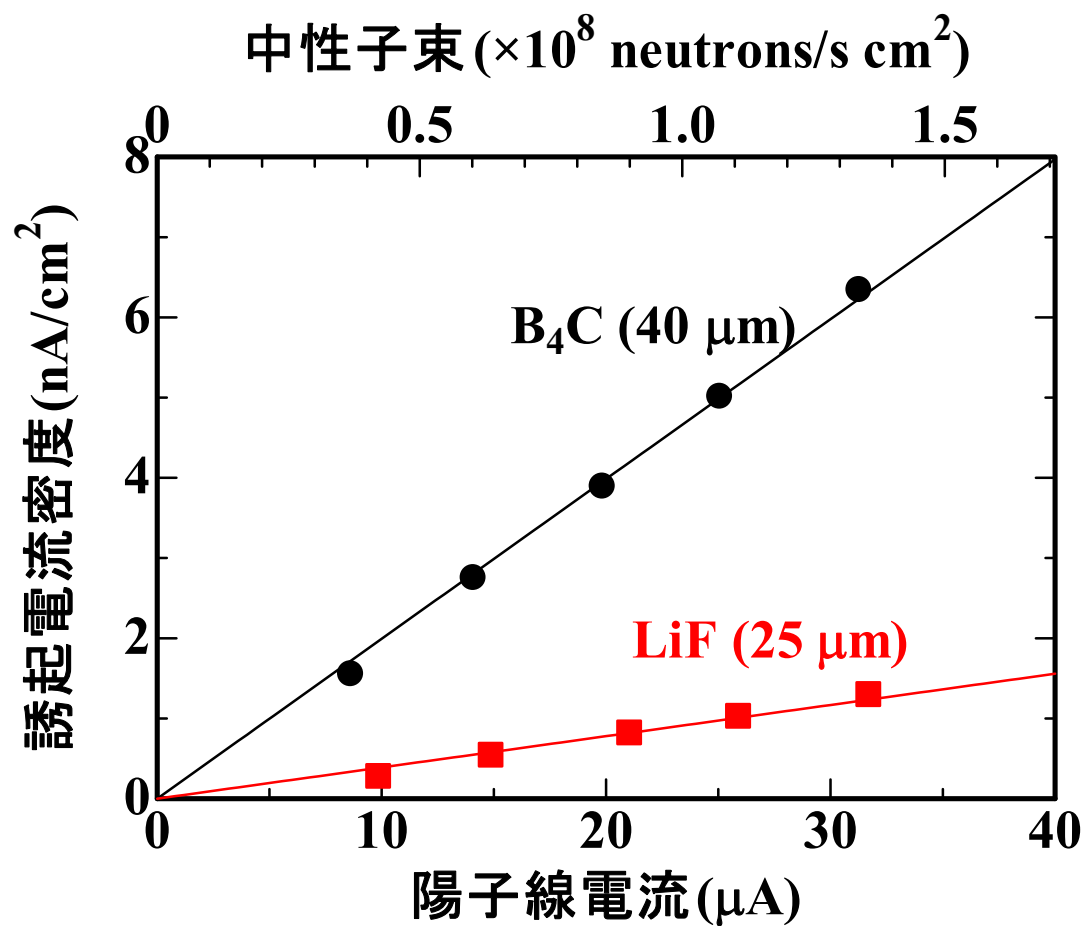


図 3.3-12 アクリルバインダーを用いて作製した B_4C 膜および LiF 膜を有した InGaP 太陽電池の誘起電流と陽子線電流の関係

3.4 太陽電池型素子の出力劣化の補正法の確立と高温環境耐性確立に関する研究

(再委託先：JAXA)

3.4.1 劣化補正法の確立

令和 2 年度に真空蒸着装置のメンテナンスを実施している。これは、この装置を令和 3 年度に、太陽電池型検出器の前面に設置するリチウム (Li) ないしホウ素 (B) などを含む中性子変換用薄膜の成膜に使用するためであった。本真空蒸着装置を用いて令和 3 年度に行った中性子変換膜の成膜実験の結果については、3.3 節に述べたとおりである。

令和 3 年度は、令和 2 年度にシャープに委託して作製し納入された InGaP 太陽電池を供試体試料として、水素 (H) イオン (陽子) および He イオンの照射試験を実施し、H ないし He による劣化特性を求めた。照射試験前後において、InGaP 太陽電池の光照射下電流－電圧 (LIV) 特性を測定し、照射による太陽電池出力の劣化を評価した。

InGaP 太陽電池は、InGaP/GaAs/Ge 構造 3 接合太陽電池のトップセルとして宇宙での使用実績があり、また JAXA では火星および水星探査機の太陽電池パドルに採用する際、シャープ製の 3 接合太陽電池にて 230 °C 程度までの高温耐性を確認している。InGaP 半導体自体は薄膜結晶成長温度が 600 °C 程度であるので 300 °C には耐えられる。課題は表裏の電極金属の熱拡散によるダイオード構造の破壊であると考えた。そこで、基本的にこの宇宙用太陽電池の金属電極構造を採用することとした。

表・裏面の金属電極材料としては、通常 3.0 μm 厚の銀 (Ag) が電極最表層に使用される。しかし、Ag は中性子照射／被曝により放射化することがわかっており、その放射線が中性子検出実験時のノイズとなる可能性が懸念された。そのため、作製した 200 枚のうち、裏面 (正極) 側の電極 (裏面全体に形成) の Ag 膜の厚さとして、正規の厚さ (3.0 μm) のもの (以後 N タイプとする)、半分の厚さ (1.5 μm) のもの (同 T タイプ)、Ag 層無し (Ti と Pd の薄膜のみ) のもの (同 B タイプ)、の 3 種類を、それぞれ 100 枚、50 枚、50 枚の内訳で作製した。なお、表面 (負極) 側の電極は光を取り込むために楕型細線形状をしており Ag 量としては少ないため、200 枚すべての太陽電池で正規の厚さ (3.0 μm) としている。納入された InGaP 太陽電池について初期性能を確認するため、LIV 特性を測定した。中性子検出器としては、中性子をアルファ粒子に変換し、太陽電池がアルファ粒子を吸収することにより誘起・発生する電流を信号として用いる。従って、太陽電池の出力特性のうちで重要なのは光発生電流 (太陽電池出力の用語としては短絡電流密度、略号は I_{sc} 、単位は mA/cm²) である。表 3.4-1 は、3 種類各 50 枚 (N タイプは半数を抽出) の InGaP 太陽電池における I_{sc} の統計値である。裏面電極構造の違いにかかわらず、ほとんど同じ性能が得られている。特に、B タイプにおいて、電極抵抗増加の影響は見られない。

本項では InGaP 太陽電池の高温における放射線劣化特性を明らかにするのが目的である。しかし令和 2 年度に、QST 高崎研の太陽電池照射用チャンバーでは高温照射試験の実施が不可能であることが判明したため、QST では室温での放射線照射試験に限定して実施した。一方、若狭湾エネルギー研究センター (WERC) にて高温照射試験の実施が可能であるため、200～300 °C での高温放射線照射試験は WERC にて実施した。この際、令和 2 年度に設計した試料マウント用治具部品を作製して使用した。また、QST と WERC の実験結果の互換性および再現性確認のため、WERC では室温での照射試験も行った。

令和 2 年度に、WERC にて使用するタンデム加速器およびイオン注入器の 2 台の加速器の照射チャンバーのヒーター内蔵試料台にて、ヒーター制御表示温度と太陽電池供試体温度の関係すなわち温度検量線を求めた（令和 2 年度既報）。その結果、前者と後者に有意な差はなかったため、ヒーター制御表示温度を照射時試料温度とし、放射線照射試験を実施した。

照射に用いる H ないし He イオンのエネルギーは、以下に示す Li ないし B による中性子変換式に基づいて決定した。



これらより、照射する He イオンのエネルギーとしては約 1.5 MeV および 2.0 MeV が候補となるが、それぞれの InGaP 結晶に対する損傷能力を示す非イオン化エネルギー損失 (NIEL) 値は、 6.31×10^{-1} と 4.90×10^{-1} [MeV・cm²/g] であり⁽⁷⁾、1.5 MeV の方がより大きな損傷を与え、太陽電池の劣化は大きくなる。劣化の過小評価を防ぐため、照射には 1.5 MeV を採用した。H イオンについては、トリチウム (³H) の加速・照射は現状不可能なので、質量は 1/3 と小さいものの ¹H イオンで代替した（質量に起因する損傷に関しては、質量数 4 の He イオンの照射により確認可能）。エネルギーは 3 MeV を採用した。Li イオンについては、1 MeV とした。さらに、どのイオンも変換膜中で減速が起き、太陽電池素子に入射するときにはより低エネルギーになっているものがあると考えるのが妥当である。一般的にイオンではエネルギーが低いほど NIEL 値は高くなり損傷が大きくなる（例えば He イオンでは 200 keV の NIEL 値は 3.26×10^0 [MeV・cm²/g]）⁽⁷⁾。そのため、減速されたイオンの代表エネルギーとして 190 (WERC) ないし 200 keV (QST) を選択してその照射を行い、低エネルギーイオンによる劣化特性を求めた。この 10 keV の差は加速器の加速性能によるもので、WERC の装置は最大が 200 keV であり、安全マージンを取った。なお、WERC では Li の加速・照射が不可能であるため、QST での室温照射のみとなっている。QST、WERC とともに、低エネルギー（190～200 keV）はイオン注入装置、高エネルギー（1～3 MeV）はタンデム加速器にて照射試験を実施した。

まず、QST と WERC の室温における照射による InGaP 太陽電池素子の劣化特性において、有意な差は認められず、よい互換性が確認された。その結果は、以下で示す WERC での照射試験結果の図中に含めて示す。図 3.4-1 は He イオン、図 3.4-2 は H イオン、図 3.4-3 は Li イオンによる InGaP 太陽電池素子の電流出力の劣化特性である。横軸はフルエンス（単位面積あたりに入射したイオン数）で表した照射量、縦軸は照射前の短絡電流密度の初期値を 1 に規格化して表した保存率 (RF) である。Li イオンの場合（室温成行のみ）を除き、試料温度は室温成行（以下「RT」と記す。）、200、250、300 °Cとし、試料温度をパラメータとして劣化特性を表している。図中の曲線は劣化を表す次の一般式、

$$RF = 1 - C \exp\left(\frac{\phi}{\phi_0}\right) \quad (3.4.1) \text{式}$$

(但し、RF：保存率、 ϕ ：フルエンス、C、 ϕ_0 ：フィッティング係数)
を用いてフィッティングを行って求めた劣化曲線である。

いずれのイオン種、エネルギーにおいても、照射時試料温度 300 °Cにて若干の劣化の緩和（低劣化）がみられる場合があるものの、250 °C以下ではRTにおける劣化特性に対して有意な差は認められずほぼデータバラツキの範囲であり、明らかな劣化の温度依存性はみられない。これより、RT～300 °Cの温度範囲では、RTでの劣化特性には温度依存性はほとんどないと判断した。一方、300 °Cでみられる若干の劣化緩和は定量的に表すほどでなく、放射線劣化による素子寿命を推定する際のマージン程度とするのが妥当である。ここで、図 3.4-1(b)において、WERCでのRTの結果が大きな劣化を示しているが、QSTの結果はWERCでの200 °C以上と同程度であることから、実験上のエラーと考えている。

以上の結果より、InGaP 太陽電池型検出素子においては、300 °Cまでの放射線劣化は室温におけるそれと差はなく、すなわち 300 °Cまで温度耐性があることが明らかとなった。

3.4.1.1 劣化補正法の確立

InGaP 太陽電池素子の劣化特性において、変位損傷線量（DDD）を用いることにより、H、He、Li 各イオンによる照射／被曝量すなわち横軸は、次式を用いて統合して表すことができる[1]。

$$DDD = \sum_{E_H} \phi(E_H) \cdot NIEL(E_H) + R_{He} \cdot \sum_{E_{He}} \phi(E_{He}) \cdot NIEL(E_{He}) \left[\frac{NIEL(E_{He})}{NIEL(3MeV)} \right]^{n_{He}-1} + R_{Li} \cdot \sum_{E_{Li}} \phi(E_{Li}) \cdot NIEL(E_{Li}) \left[\frac{NIEL(E_{Li})}{NIEL(1MeV)} \right]^{n_{Li}-1} \quad (3.4.2) \text{式}$$

(但し、 $\phi(E)$ ：エネルギーEの粒子のフルエンス、R：変換係数、n：補正係数、下付き文字は粒子種を表す。)

ここで、1項目はH、2項目はHe、3項目はLiにおける照射／被曝量を表す。

(3.4.2)式において、当初目標としていた劣化補正法は、統合パラメータである

$$R_x, n_x$$

を温度Tの関数、すなわち

$$R_x(T), n_x(T)$$

として表すことを試みることであった。しかし、前項で述べたようにRT～300 °CではHおよびHeによる放射線損傷劣化はほぼ同程度であり関数化するほどには依存性がみられなかったため、またLiにおいては今回の実験ではRTのみの結果であるが同じく劣化の温度依存性はないと推定されるため、この温度範囲すなわち現在想定している原子炉内応用においては、RTでの統合パラメータを用いればよく、300 °Cでみられる場合がある若干の低劣

化は寿命推定マージンと考えればよいという結論を得た。図 3.4-1～3 における H、He、Li イオンによる RT での劣化特性データについて、横軸を DDD（粒子の NIEL 値とフルエンスの積）に変換してプロットしたものをそれぞれ図 3.4-4～6 に示す。また、DDD の計算に用いた、今回照射したイオンの NIEL 値を表 3.4.2 に記す。図 3.4-7 はそれらをまとめてひとつのグラフ上にプロットしたものであるが、イオン種ごとの劣化傾向に差がある。これを補正して 1 本の劣化曲線にすべての劣化データが沿うようにするべく、(3.4.2)式における He、Li それぞれの換算係数 R、補正係数 n の 2 パラメータをベストフィットにより求めた。その結果、表 3.4.3 の値が得られた。これら得られた統合パラメータ値を用いれば、(3.4.2)式は

$$DDD = \sum_{E_H} \phi(E_H) \cdot NIEL(E_H) + 0.091 \cdot \sum_{E_{He}} \phi(E_{He}) \cdot NIEL(E_{He}) \left[\frac{NIEL(E_{He})}{NIEL(3MeV)} \right]^{0.5} + 0.077 \cdot \sum_{E_{Li}} \phi(E_{Li}) \cdot NIEL(E_{Li}) \left[\frac{NIEL(E_{Li})}{NIEL(1MeV)} \right]^{0.6} \quad (3.4.3) \text{式}$$

と表される。ここで、換算係数 R は H、He、Li による損傷の比を表しており、それらイオンの相対損傷係数としての意味を有する。

この(3.4.3)式により、H、He、Li による劣化特性をプロットすると、図 3.4-8 のようになり、InGaP 太陽電池の電流出力 I_{sc} の劣化特性は図中に示した統合されたひとつの曲線で表すことができた。その劣化式は (3.4.1)式を用いて、

$$RF = 1 - 0.062 \exp \left(\frac{DDD}{5.0E9} \right) \quad (3.4.4) \text{式}$$

と表わされる。ここで得た換算係数 R、補正係数 n の妥当性を確認するため、同じ値を電圧出力 V_{oc} の劣化データに適用して得た結果が図 3.4-9 である。 I_{sc} と同様に劣化データは 1 本の曲線上に極めてよく沿っており、得られた結果の妥当性が確認された。

以上より、B ないし Li による中性子変換にて発生する放射粒子に起因する InGaP 太陽電池型検出素子の劣化特性は(3.4.3)式によって関数化される。この関数式により、推定被曝量を見積もることが可能な場合には劣化補正ができ、また標準線源を用いて出力信号を測定することで被曝量を推定することが可能となる。

3.4.2 高温耐性の確立

本項の令和 3 年度の実施内容として大きくは、①InGaP 太陽電池の高温耐性確認のための高温保持試験、および②高温での放射線耐性／劣化確認試験があるが、②の放射線劣化特性については 3.4.1 項において既に示したため、ここでは①の高温耐性についてのみ記す。

令和 2 年度に、JAXA の遊休資産であった高温乾燥槽（最高温度 300℃）を入手したことを報告した。この装置の高温連続運転（3 日間）を実施したところ、特に問題が無いこ

とが確認されたため、本装置にて高温保持試験を行うこととした。

まず、今回供試体とする InGaP 太陽電池について、室温から 300 °C まで定常動作をするのか、すなわち RT からの出力パラメータ、特に電流出力 I_{sc} の温度係数が室温から 300 °C まで変わらず一定であることを確認する実験を行った。温度係数が一定であれば、温度に対する出力の変化は線形（直線）であるはずである。測定実験では、図 3.4-10 に示すように疑似太陽光源下のサンプルステージ上にホットプレートを設置し、供試体温度を変化させながら InGaP 太陽電池の LIV 特性を取得した。得られた出力パラメータの温度依存性を図 3.4-11 に示す。RT から 300 °C までの温度変化は直線で表されている。従って、RT から 300 °C まで定常動作をする（ある温度において動作状態が変化することはない）ことが確認された。また、RT から昇温時（図 3.4-11(a)）と 300 °C から降温時（図 3.4-11(b)）において、温度係数（直線の傾き）はよく一致しており、300 °C で劣化が起きていないことがわかる。この実験から、高温保持試験においては、供試体を RT に戻してから出力特性を測定することで、高温耐性を評価可能であることが確認された。

次に高温乾燥炉を用い、まず 200 °C にて高温保持試験を行った。InGaP 太陽電池の試料数は 3、雰囲気は大気である。試験時間は 300 時間以上とした。試験前に LIV 測定により初期電流出力 I_{sc} を得た後、予め設定温度に保持させた高温乾燥炉に装入。50 時間毎を目途に試料を取出して RT まで降温させてから LIV 測定を行い、 I_{sc} 値を得た。結果を図 3.4-12(a) に示す。縦軸は初期値を 1 に規格化した保存率としている。300 時間以上まで有意な出力低下がみられない。そこで、当初予定した 250 °C での試験を省略し、300 °C での試験を実施した。試験法は 200 °C と同様である。結果を図 3.4-12(b) に示す。やはり出力低下はみられず、むしろ増加する傾向が確認された。

以上より、今回供試体として用いた InGaP 太陽電池は、酸素や水蒸気が含まれる大気中という厳しい環境にもかかわらず、電流出力に 300 °C にて 300 時間以上劣化がないことが確認された。

3.4.4 まとめ

令和 3 年度の実施内容として InGaP 太陽電池を、原子炉内における B、Li を変換材料とした中性子検出素子として応用することを想定し、最高温度 300 °C までの、①高温耐性確認のための高温保持試験、および②高温での放射粒子に対する（H、He、Li イオン）耐性/劣化確認試験を行った。その結果、①において劣化は室温における劣化特性と同等であること、②においては 300 時間以上の耐性があることが確認された。これより、InGaP 太陽電池の原子炉内での中性子検出素子応用の大いなる可能性が理解された。

参考文献

- (7) M. Imaizumi, Y. Okuno, T. Takamoto, S. Sato, and T. Ohshima, “Displacement damage dose analysis of the output characteristics of $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$ and $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})(\text{S}, \text{Se})_2$ solar cells irradiated with alpha ray simulated helium ions, ” Japan J. Applied Physics, Vol. 61, No.4, 044002, 2022, DOI:10.35848/1347-

表 3. 4. 1 InGaP 太陽電池の電流出力の裏面電極構造別の統計処理結果

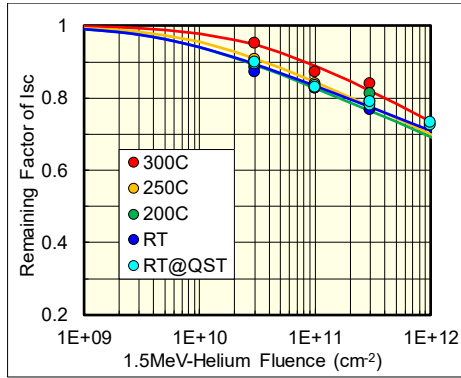
Backside electrode	Ti/Pd	Ti/Pd/Ag(1.5 μ m)	Ti/Pd/Ag(3.0 μ m)
Number of samples	50	50	50
Average (mA/cm ²)	14.76	14.87	14.89
Minimum (mA/cm ²)	14.65	14.69	14.75
Maximum (mA/cm ²)	14.90	14.98	15.02
Std. Dev. σ (mA/cm ²)	0.0510	0.0506	0.0544

表 3. 4. 2 計算に用いた各イオンの InGaP に対する NIEL 値 (単位 : MeV $\cdot$ cm²/g)

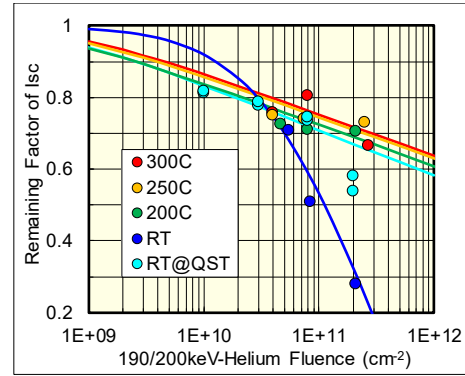
Particle	H	He	Li
Low Energy	2.15 $\times$ 10 ⁻¹ (190-200 keV)	3.26 $\times$ 10 ⁰ (190-200 keV)	1.14 $\times$ 10 ¹ (200 keV)
High Energy	2.08 $\times$ 10 ⁻² (3 MeV)	6.31 $\times$ 10 ⁻¹ (1.5 MeV)	3.33 $\times$ 10 ⁰ (1 MeV)

表 3. 4. 3 InGaP 太陽電池の劣化補正パラメータ

Particle	H (基準)	He	Li
Conversion coefficient: R	1	0.091	0.077
Compensation factor: n	1	1.5	1.6

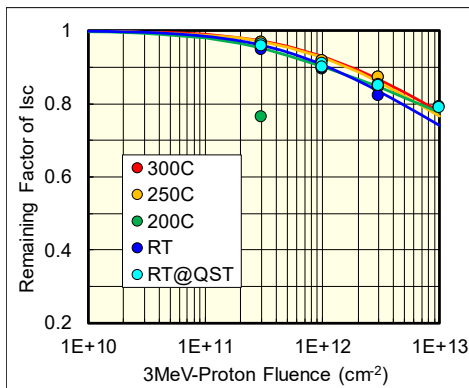


(a) 2MeV

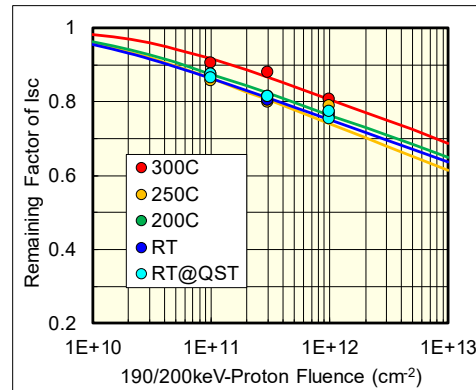


(b) 190/200 keV

図 3. 4-1 InGaP 太陽電池の短絡電流密度 (I_{sc}) の He イオン照射による照射時温度をパラメータとした劣化特性. (a) はエネルギーが 2 MeV、(b) はエネルギーが 190 ないし 200 keV

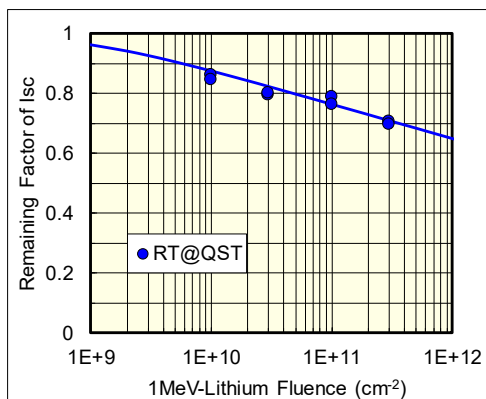


(a) 3 MeV

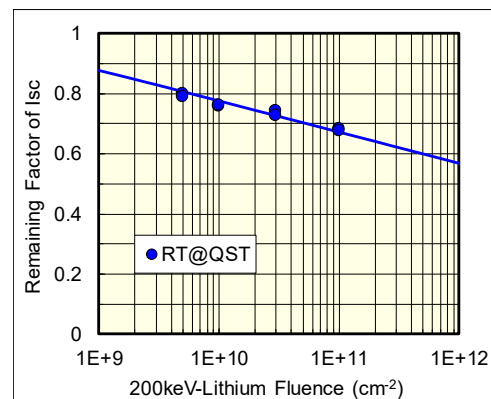


(b) 190/200 keV

図 3. 4-2 InGaP 太陽電池の短絡電流密度 (I_{sc}) の H イオン照射による照射時温度をパラメータとした劣化特性. (a) はエネルギーが 3 MeV、(b) はエネルギーが 190 ないし 200 keV



(a) 1 MeV



(b) 200 keV

図 3. 4-3 InGaP 太陽電池の短絡電流密度 (I_{sc}) の Li イオン照射による室温 (RT) での劣化特性. (a) はエネルギーが 1 MeV、(b) はエネルギーが 200 keV

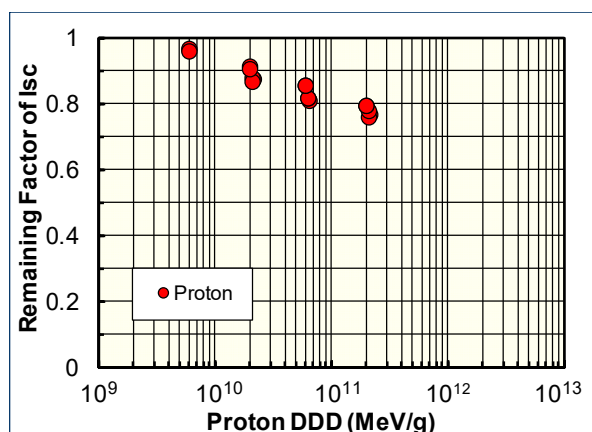


図 3. 4-4 横軸を変位損傷線量（DDD）によりプロットした、InGaP 太陽電池の短絡電流密度（Isc）の H イオン照射（エネルギー 3 MeV、190/200 keV）による室温での劣化特性

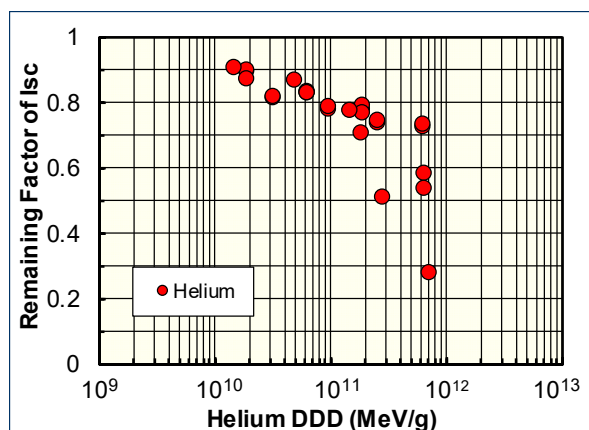


図 3. 4-5 横軸を変位損傷線量（DDD）によりプロットした、InGaP 太陽電池の短絡電流密度（Isc）の He イオン照射（エネルギー 1.5 MeV、190/200 keV）による室温での劣化特性

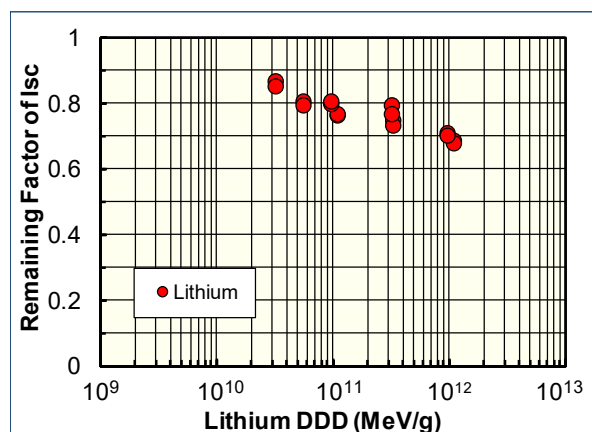


図 3. 4-6 横軸を変位損傷線量（DDD）によりプロットした、InGaP 太陽電池の短絡電流密度（Isc）の Li イオン照射（エネルギー 1 MeV、200 keV）による室温での劣化特性

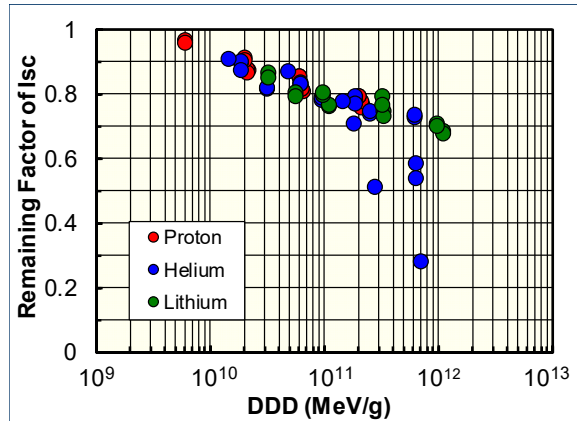


図 3.4-7 H、He、Li イオン照射による InGaP 太陽電池の短絡電流密度 (I_{sc}) の室温での劣化特性の変位損傷線量 (DDD) によるプロット

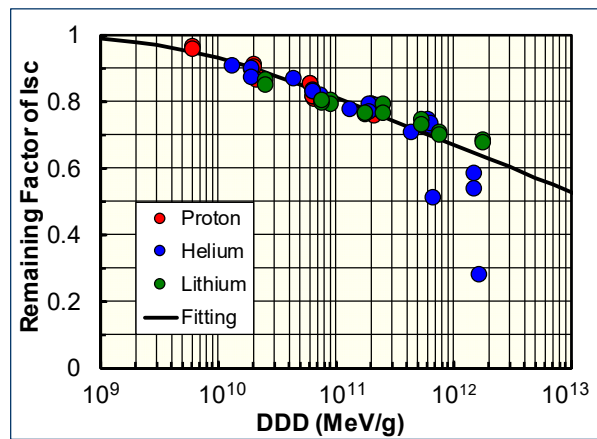


図 3.4-8 H、He、Li イオン照射による InGaP 太陽電池の短絡電流密度 (I_{sc}) の室温での劣化特性の補正した変位損傷線量 (DDD) によるプロット

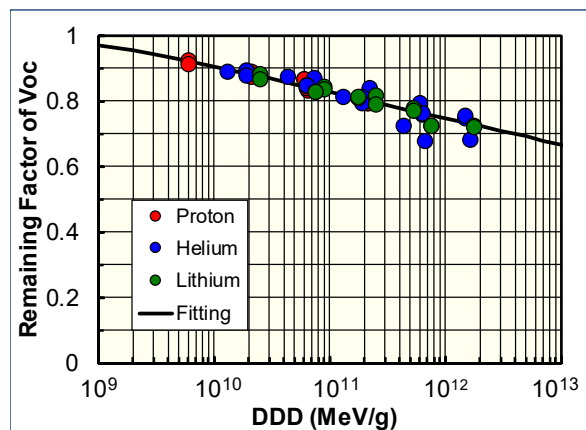


図 3.4-9 H、He、Li イオン照射による InGaP 太陽電池の開放電圧 (V_{oc}) の室温での劣化特性の I_{sc} と同一の補正をした変位損傷線量 (DDD) によるプロット

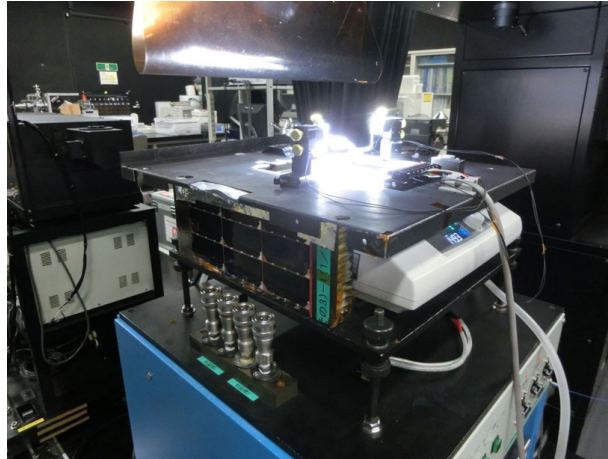
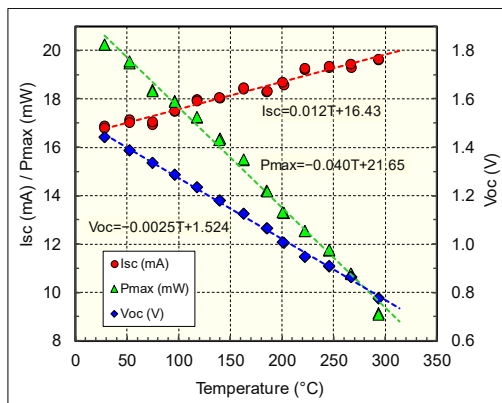
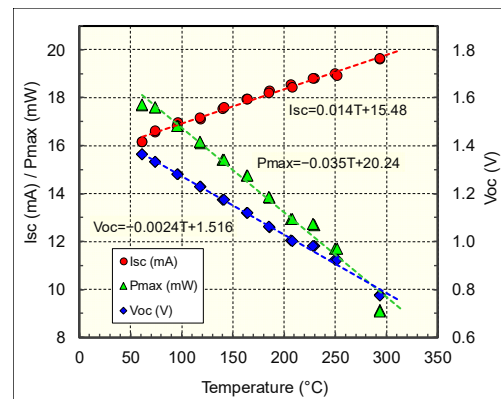


図 3.4-10 InGaP 太陽電池の出力パラメータ温度依存性の測定概観

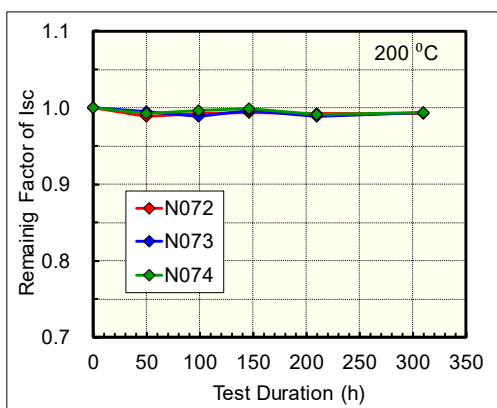


(a) 昇温時

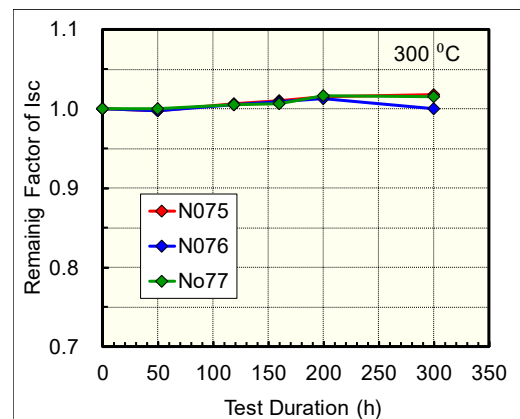


(b) 降温時

図 3.4-11 InGaP 太陽電池の出力パラメータの温度依存性. (a)は RT からの昇温時、(b)は 300°Cからの降温時の結果



(a) 200°C



(b) 300°C

図 3.4-12 高温保持試験による、InGaP 太陽電池の電流出力 I_{sc} の変化. (a)は 200°C、(b)は 300°C

3.5 太陽電池型検出素子における α 線（He イオン）誘起劣化の He エネルギー依存性解明のための、照射技術開発と、He 誘起劣化特性取得（再委託先：QST）

3.5.1 劣化特性解明

太陽電池素子への He イオン照射を行った。チャンバー内サンプル保持治具の作製を行った。太陽電池素子における He イオン誘起劣化特性を JAXA と共同で取得し、特性劣化の結果より照射条件の最適化検討を行った。

太陽電池型検出素子における α 線（He イオン）誘起劣化の He エネルギー依存性解明のためには、加速器からの He イオン照射が必要である。照射には、QST 高崎量子応用研究所が所有のイオン注入器、タンデム加速器ビームライン上にある、汎用照射チャンバーを用いる。効率的なサンプルへの照射を行うためには、適切な照射条件と、限られた時間で多くのサンプルへの照射が可能なシステム改良（令和 2 年度事業）を行い、照射実験を行った。表 3.5-1 に照射実験の実績リストを示す。前節（東北大・JAXA 報告）にある通り、十分な照射実験を行うことができおり、それらを基にした有用な知見・考察が得られている。

表 3.5-1 TIARA における令和 3 年度照射実験実績

日付	エネルギー イオン チャンバ	サンプル
2021/5/18	1.5, 5 MeV He+ TA	InGaP
2021/6/30	1.5 MeV He+ TA	InGaP
2021/8/31	5 MeV He+ MT	InGaP
2021/10/25	5 MeV He+ MT	InGaP
2021/11/05	5 MeV He+ MT	InGaP

3.5.1.1 ヘリウムイオン誘起劣化特性の取得

JAXA, 東北大学とともに、照射条件の最適化と照射、劣化特性の取得を行った。劣化特性の結果は、各機関の報告に示す通りである。照射条件の最適化に関しては、前節にある通り、QST と WERC の RT における照射による InGaP 太陽電池素子の劣化特性において、有意な差は認められなかった。さらに、高温下での検討においても InGaP 太陽電池型検出素子は、300 °C までの温度下での照射による放射線劣化が室温におけるそれと差はなく、300 °C まで温度耐性があることが明らかとなり、照射条件の最適化を図ることができた。

3.6 研究推進

研究代表者の下で、各研究項目間の連携を密にして研究を進めるとともに、およそ3か月に1回、研究打ち合わせを行った。令和4年1月末に「産業利用に向けたリアルタイムモニタリングのための太陽電池型線量計研究会」と題する研究会を開催し、関連する研究テーマをもつ外部研究者を招いて講演を依頼するとともに、本研究メンバー全員が発表を行った。

令和4年1月末および3月上旬に全関係者にて令和3年度のまとめを行い、研究の進捗を検証した。打合せはオンラインを中心に行ったが、所属機関および訪問先のルールを遵守しつつ可能な限り現場を見ることを心掛けた。

4. 結言

本研究では SMR 中で安定に使用できる中性子線量計の開発を目的として、令和 3 年度は以下の事項を実施した。

コンバータを載せた太陽電池素子に対し、理研加速器駆動小型中性子源にて中性子照射（常温）を行った。遮蔽体／減速材により中性子エネルギースペクトルと γ 線を変化させ、誘起電流の測定値と計算値との比較評価を行った。

ヒーターにより照射中の温度を 200 °C 以上まで昇温して保持できる高温照射ホルダーを製作し、太陽電池素子の照射と in-situ 電流測定・劣化評価を行った。

実験により取得した太陽電池型検出素子の特性から電流信号を読み込み、電流信号の値から線量率を解析するソフトウェアを作成した。また、 α 線劣化挙動の結果と中性子計測中の電流信号より、素子の劣化状況を見積もり、線量率を補正するシステムの開発方法を解明した。また、 γ 線信号の簡単な信号除去特性を、2 回路素子の結果と比較することにより検証した。

He イオン加速器を使用してボロンコンバータより放出される α 線を模擬し、太陽電池素子に照射して誘起される電流量を測定し、その原理を検討した。

ボロンコンバータを成膜した太陽電池素子に中性子照射を行い、誘起される電流量を測定し、その原理を検証した。

太陽電池素子に γ 線照射を行い、誘起される電流量を測定してその原理を検証した。

スパッタ法などを用いて中性子／ α 粒子変換膜構造のホウ素化合物などの成膜・評価を行った。さらに、化合物太陽電池のコンバータ層を形成し、電極を取り出す方法を検討した。具体的に用いた手法はスパッタ法に加え、蒸着法および印刷法である。

令和 2 年度に作製した InGaP 太陽電池を供試体として、 α 線模擬の He イオン照射試験を行った。その際、加速エネルギーを 0.02～2 MeV の範囲で変化させた。まず室温にて出力劣化データを取得し、次に 200～300 °C の高温にて同データを取得した。室温照射は QST 高崎研で、高温照射は WERC で実施した。

取得した出力劣化データを基に、宇宙用太陽電池における解析法を応用して相対損傷係数を導き出した。次に、変位損傷線量法を用いて陽子および電子に対する劣化特性との比較解析を行い、劣化補正法を確立した。

InGaP 太陽電池の高温連続保持試験を行い、高温環境における劣化を明らかにした。雰囲気は大気中で行い、劣化が小さかったため不活性ガスないし真空での試験の追加はしなかった。温度はまず 200 °C で実施し、300 °C での試験を追加した。

太陽電池素子への He イオン照射を行った。チャンバー内サンプル保持治具の作製を行った。太陽電池素子における He イオン誘起劣化特性を JAXA と共同で取得し、特性劣化の結果より照射条件の最適化検討を行った。検討結果をフィードバックした条件で照射を行った。研究代表者の下で、各研究項目間の連携を密にして研究を進めるとともに、およそ 3 か月に 1 回、研究打ち合わせを行った。令和 4 年 1 月末および 3 月上旬に全関係者にて令和 3 年度のまとめを行い、研究の進捗と方向性を検証した。

以上、2 カ年計画の 2 年目である令和 3 年度の業務項目を実施し、所期の目標を達成した。